
Wahrscheinlichkeitsbasierte Fahrzeugdiagnose mit individueller Prüfstrategie

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Olaf Krieger
aus Magdeburg

eingereicht am: 14.06.2011

mündliche Prüfung am: 05.09.2011

Berichterstatter: Prof. Dr. T. Form

Mitberichterstatter: Prof. Dr. J.-U. Varchmin

Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der VOLKSWAGEN AG zugelassen.

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der VOLKSWAGEN AG.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Elektrik-/Elektronikentwicklung der Volkswagen AG in Wolfsburg.

Mein besonderer Dank gilt den Herren Klaus Lange und Dietmar Peters, die mir die Möglichkeit gegeben haben, diese Arbeit anzufertigen. Auch für die Anregungen zur thematische Ausrichtung, sowie für die fachliche und organisatorische Unterstützung möchte ich mich bei ihnen bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Form danke ich für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit. Seine Anregungen sowie zahlreiche Diskussionen trugen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit bei. Prof. Dr.-Ing. Jörn-Uwe Varchmin danke ich für die Erstellung des Zweitgutachtens sowie für die anregenden Gespräche zum Thema.

Meinen Kollegen Andreas Breuer und Tobias C. Müller sowie den ehemaligen DiplomandenInnen Susanne Schwarzkopf und Björn Schwennicke danke ich für die organisatorische und fachliche Unterstützung vor allem bei der Umsetzung des Diagnosesystems sowie für die zahlreichen fachlichen Diskussionen.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Katrin Krieger, die mich die gesamte Zeit unterstützt und motiviert hat. Ich danke ihr vor allem für das Verständniss, das sie mir und dieser Arbeit entgegengebracht hat, auch wenn dem unzählige Wochenenden und Urlaubswochen zum Opfer gefallen sind.

Lostau, 13. Juni 2011
Olaf Krieger

Kurzfassung

In Zukunft werden neuartige Diagnoseverfahren benötigt, die fahrzeugindividuelle Ausstattungen berücksichtigen und auf hinterlegte Fehlersuchprogramme verzichten können. Der Grund dafür liegt in der zunehmenden Komplexität und Variantenvielfalt elektronischer Fahrzeugsysteme. Aktuelle Diagnosesysteme verwenden hinterlegtes Expertenwissen in Form von Fehlersuchprogrammen, um den Benutzer bei der Fehlersuche zu führen. Der Aufwand für die Erstellung eines vollständigen Sets von Fehlersuchprogrammen für ein Fahrzeug steigt mit der Komplexität und der Variantenvielfalt der elektronischen Systeme.

Die vorliegende Arbeit beschreibt ein System, das durch Anwendung von Verfahren aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz bestehende Diagnosesysteme erweitert. Dadurch wird es möglich, auf Grund von Wissen über ein Fahrzeug und den bestehenden Fehlersymptomen auf Fehlerkandidaten zu schließen und automatisch sinnvolle Prüfanweisungen zu generieren. Auf manuell erstellte Fehlersuchprogramme kann dadurch in vielen Fällen verzichtet werden. Die Prüfanweisungen werden dem Mechaniker – vergleichbar mit manuell erstellten Fehlersuchprogrammen – in optimierter Reihenfolge angezeigt und ermöglichen dadurch eine schrittweise Eingrenzung der Fehlerursache.

Die Herausforderung bei der Entwicklung der in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren besteht in der Anforderung, dass die zugrundeliegende Wissensbasis mit Informationen auskommen soll, die sich automatisch aus vorhandenen Daten der Entwicklung, der Produktion und des Services ableiten lassen. Ein Beispiel für die automatische Ableitung von Diagnosewissen ist die Generierung eines fahrzeugindividuellen Datensatzes während der Fertigung eines Fahrzeugs. Diese elektrische Strukturbeschreibung beschreibt alle elektrischen Systeme (einschließlich aller Bordnetzkomponenten) des Fahrzeugs. Aus diesem Datensatz wird bei einem späteren Servicefall im Diagnosesystem ein Bayes-Netz generiert, mit dem, ausgehend von vorliegenden Fehlersymptomen wie Ereignisspeichereinträgen, Messergebnissen oder Kundensymptomen, eine gewichtete Liste mit Fehlerkandidaten generiert wird. Bayes-Netze ermöglichen in diesem Anwendungsfall das Schließen von mehr oder weniger unsicheren Symptomen auf die wahrscheinlichsten Ursachen, indem sie für jeden Kandidaten eine Fehlerwahrscheinlichkeit berechnen. Darin besteht der Hauptunterschied zum regelbasierten oder logischen Schließen, welches lediglich eine Schwarz-Weiß-Betrachtung ermöglicht.

Mit Hilfe der Strukturbeschreibung können für jeden Fehlerkandidaten Prüfanweisungen generiert werden. Dies ist vor allem bei Fehlern in der Fahrzeugelektrik durch Ableitung von Messungen und Benennung der erforderlichen Messpunkte vollständig automatisierbar. Damit das Diagnosesystem eine effiziente und kostenoptimale Fehlereingrenzung ermöglicht, wurde ein Verfahren zum Ermitteln der optimalen Prüfsequenz entwickelt. Dieses ermittelt für jeden der Prüfschritte den Aufwand sowie den zu erwartenden Informationsgewinn und entscheidet daraufhin, welche Prüfanweisung dem Mechaniker als Nächstes angezeigt wird. Auf Grund der durchgeführten Prüfungen stehen dem Diagnosesystem im Laufe einer Diagnosesitzung zunehmend mehr Informationen zur Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeiten zur Verfügung. Dadurch kristallisiert sich die eigentliche Fehlerursache sukzessive aus der Menge der Fehlerkandidaten heraus. Es werden Probleme bestehender Diagnosesysteme analysiert und daraus Anforderungen an neuartige Verfahren abgeleitet. Die daraufhin entwickelten Verfahren werden beschrieben und bezüglich des geplanten Einsatzszenarios analysiert. Die Verfahren wurden in Software umgesetzt und in ein zu diesem Zweck entwickeltes Diagnosesystem integriert. Um die Potentiale der entwickelten Verfahren bewerten zu können, wurde das entstandene Diagnosesystem in einem umfangreichen Evaluierungsverfahren mit dem bisher verwendeten System verglichen.

Abstract

In future, new diagnostic approaches that take a vehicle's individual configuration into account and don't rely on stored diagnostic routines are needed. This requirement is based on an increasing complexity and variety in variants of electronic vehicular systems.

Today's diagnostic systems utilize stored diagnostic routines based on expert knowledge in order to guide the user through failure finding. The efforts and costs for creating a complete set of diagnostic routines for a vehicle increase exponentially with the complexity and variety in variants of its electronic systems.

This thesis describes a system that enhances present diagnostic systems by applying methods from the field of artificial intelligence. That enables the system to autonomously infer from failure candidates to failure causes in order to generate meaningful inspection instructions. Thus, manually created diagnostic routines become obsolete in many cases. The generated inspection instructions are presented to the mechanic in an optimized order (in the same manner as with manually created instructions) and hence allow for an incremental localization of the failure cause.

One requirement for the methods described in this thesis was that the knowledge base should consist only of information that can be automatically derived from available data from development, production and service. This requirement posed a significant challenge for the development of the approaches in this thesis. An example for such automatic derivation of diagnostic knowledge is the generation of a dataset describing all electrical systems (including board net components) for one individual vehicle during production. Based on this dataset, a Bayesian network can be generated in the diagnostic system in a later case of service. This Bayesian network can generate a ranked list with failure candidates, taking failure symptoms like diagnostic events (DTC), test results and customer symptoms into account. In this use case Bayesian networks are utilized to infer from more or less uncertain symptoms to possible causes by calculating a failure possibility for each failure candidate. This method points out the main difference to rule-based or logical inference that yields only a binary approach to possible failure causes.

Deploying the structural description, inspection instructions can be generated for each failure candidate. This generation can be fully automatized for failures in the electric network of a vehicle by deriving measurements and identifying necessary measurement points. In order to enable an efficient and cost-optimal failure localization, a method for identifying an optimal test sequence has been developed. This method computes the cost and expected information gain for each test step and decides which instruction is presented next to the mechanic. Taking the already performed tests and their results into account, more and more information can be used for calculating the failure possibilities during a diagnostic session. Thus, the actual failure cause will be identified successively from the set of failure candidates. The thesis is structured as follows: For deriving requirements for new methods, problems of present diagnostic systems are analyzed. After an extensive description of the newly developed methods, they will be analyzed with respect to the scenarios they will be used in. The methods have been implemented as software and integrated into a tailor-made diagnostic system. Finally, the new diagnostic system is compared to the present diagnostic system in an extensive evaluation in order to point out the potentials of the developed methods.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Fragestellung und Ziel der Arbeit	2
1.2. Abgrenzung	3
1.3. Inhalt der Arbeit	4
2. Stand der Technik	5
2.1. Fahrzeugdiagnose	5
2.1.1. On-Bord-Diagnose in Fahrzeugsystemen	8
2.1.2. Verbindung von On- und Off-Board-Diagnose	11
2.1.3. Off-Board-Diagnosesysteme	13
2.2. Bayes-Netze	18
2.2.1. Wahrscheinlichkeitstheorie	18
2.2.2. Graphentheorie	20
2.2.3. Semantik von Bayes-Netzen	21
2.2.4. Berechnen der Wahrscheinlichkeiten	22
2.2.5. Besondere Formen von Bayes-Netzen	24
2.2.6. Anwendung in der Diagnose	25
3. Problemanalyse	27
3.1. Mögliche Fehlerursachen	27
3.2. Prüfanweisungen	30
3.3. Fehlersuchstrategie	31
3.4. Zusammenfassung Kapitel 3	31
4. Wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung	33
4.1. Anforderungen an die Fehlerkandidatenermittlung	33
4.2. Verfügbares Diagnosewissen	36
4.2.1. Strukturbeschreibende Daten	36
4.2.2. Beschreibung der Diagnosefunktionen	37
4.2.3. Ermittlung der Wirkketten	38
4.2.4. Felddaten	40
4.3. Generierung der Bayes-Netze	40
4.3.1. Struktur der Netze	41
4.3.2. Analyse des Netzes	45
4.3.3. Befüllen der Wahrscheinlichkeitstabellen	46
4.4. Optimierung des Netzes	47
4.4.1. Optimierungspotenzial	47
4.4.2. Einfügen zusätzlicher Knoten	47
4.4.3. Logisches Zusammenfassen	48
4.5. Ermittlung der Ursache von Fehlerschauern	52
4.6. Clusterung der Kandidaten bei unabhängigen Fehlern	53
4.7. Einsatz im Diagnosesystem	54
4.7.1. Setzen der Fehlersymptome	54
4.7.2. Dynamische Fehlerkandidatenliste	55
4.8. Test der Fehlerkandidatenermittlung	57
4.9. Zusammenfassung Kapitel 4	61

5. Individuelle Generierung von Prüfschritten	63
5.1. Anforderungen an die Generierung von Prüfschritten	63
5.2. Generierung und Ausgabe von Prüfungen	64
5.2.1. Parametrierbare Prüfanweisungen	64
5.2.2. Prüfgeneratoren	65
5.3. Generierung von Durchgangsprüfungen	66
5.4. Überprüfung der Spannungsversorgung	68
5.4.1. Propagierung von Signalen	68
5.4.2. Generierung von Spannungsmessungen	70
5.4.3. Generierung von Masseprüfungen	72
5.4.4. Gleichzeitige Überprüfung mehrerer Strompfade	73
5.5. Finden von Kurzschlüssen	74
5.6. Überprüfung elektrischer Bauteile	74
5.6.1. Messung komplexer Signale	75
5.6.2. Messung von Strömen	76
5.6.3. Manuell erstellte Fehlersuchprogramme	77
5.7. Einsatz im Diagnosesystem	78
5.7.1. Auswertung der Prüfergebnisse	78
5.7.2. Aktualisierung der Prüfungen	78
5.7.3. Darstellung von Zusatzinformationen	79
5.8. Test der Prüfgeneratoren	79
5.9. Zusammenfassung Kapitel 5	81
6. Dynamischer Prüfablauf	83
6.1. Das Prüfsequenzproblem	85
6.2. Anforderungen an den dynamischen Prüfablauf	85
6.3. Bewertung der Prüfungen	86
6.3.1. Aufwand einer Prüfung	87
6.3.2. Kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit	88
6.3.3. Informationsgewinn einer Prüfung	89
6.3.4. Gegenüberstellung der Kriterien	90
6.4. Zweistufige Prüfstrategie	91
6.4.1. Ermittlung des Top-Fehlerkandidaten	92
6.4.2. Prüfen des Top-Fehlerkandidaten	92
6.4.3. Clusterung der Prüfungen bei unabhängigen Fehlern	93
6.5. Dynamischer Prüfplan	94
6.5.1. Hinzufügen und Entfernen von Prüfungen	94
6.5.2. Auswahl der nächsten Prüfung	96
6.5.3. Ausgabe der Prüfung	96
6.5.4. Auswerten des Prüfergebnisses	97
6.6. Test des Prüfablaufs	97
6.7. Zusammenfassung Kapitel 6	100
7. Evaluierung des Diagnosesystems	101
7.1. Verfahren zur Bewertung des Diagnosesystems	101
7.2. Beschreibung der zu untersuchenden Diagnosesysteme	102
7.3. Konzeptbewertung	107
7.3.1. Vergleich FiDis mit GFS	108
7.3.2. Vergleich Diagnose Internetportal mit GFS	114
7.3.3. Vergleich Neucus mit GFS	116
7.3.4. Zusammenfassung der Konzeptbewertung	116
7.4. Werkstatteprobung	117

7.4.1.	Ausgewählte elektrische Fehler	118
7.4.2.	Zusammenfassung der Werkstatteprobung	124
7.5.	Erprobung mit Felddaten	124
7.5.1.	Aussagekraft der initialen Fehlerkandidatenliste	126
7.5.2.	Inhalt und Reihenfolge der Prüfungen	128
7.6.	Auswertung der Evaluierung	132
7.6.1.	Stärken und Schwächen	132
7.6.2.	Kombination von FiDis mit der GFS	133
8.	Zusammenfassung und Ausblick	135
8.1.	Zusammenfassung der Arbeit	135
8.2.	Ausblick	137
A.	Tests und Ergebnisse	139
A.1.	Test der Fehlerkandidatenermittlung	139
A.1.1.	Prüfung der Grundfunktionen	139
A.1.2.	Prüfung mit komplexem Fehlerbild	142
A.1.3.	Unabhängige Fehler mit manueller Symptomeingabe	144
A.1.4.	Einfluss von Fehlern in Strukturdaten	145
A.1.5.	Einfluss von Fehlern in Felddaten	146
A.1.6.	Speicherbedarf der Netze	148
A.1.7.	Performance	149
A.2.	Test der Prüfgeneratoren	150
A.2.1.	Test der Grundfunktion	150
A.2.2.	Signalprüfungen	152
A.2.3.	Komplexes Fehlerbild	154
A.2.4.	Einfluss der Signaldefinitionen	156
A.3.	Test des Prüfablaufs	157
A.3.1.	Gewichtung der Prüfungen	157
A.3.2.	Veränderung der Gewichtung in Folge von Prüfergebnissen	161
A.3.3.	Benutzerinteraktion	164
A.3.4.	Vergleich der Gewichtungsverfahren	166
	Tabellenverzeichnis	172
	Abbildungsverzeichnis	174
	Abkürzungen	175
	Symbolverzeichnis	177
	Literaturverzeichnis	184

1. | Einleitung

In Fahrzeugen kommt heute eine Vielzahl unterschiedlicher elektronischer Systeme zum Einsatz. Auf Grund der wachsenden Nachfrage an aktiven Sicherheitssystemen, Kraftstoff sparenden Antriebssystemen, Fahrerassistenzsystemen sowie Komfort- und Unterhaltungselektronik nimmt die Komplexität der Fahrzeugelektronik stetig zu. Die Herausforderung bei der Entwicklung neuer Fahrzeuge besteht darin, auch unter diesen Randbedingungen die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Fahrzeuge stetig zu verbessern, sowie die Kosten für Service und Instandhaltung zu minimieren. Leistungsfähige Diagnosesysteme, die Störungen rechtzeitig und sicher erkennen und den Mechaniker¹ in der Kfz-Werkstatt optimal bei der Instandsetzung unterstützen, können dazu einen wichtigen Beitrag leisten. In [Hei06] ist darüber hinaus beschrieben, dass die Leistungsfähigkeit der Fahrzeug-Diagnose durchaus positive Auswirkungen auf die Kundenzufriedenheit hat. Eine Fehlerabstellung, die im Vergleich zum Wettbewerb schneller und nachhaltiger erfolgt, hat dadurch nicht nur unmittelbare wirtschaftliche Vorteile für den Hersteller (im Gewährleistungszeitraum), sondern kann auch das Image der Marke sowie der Servicebetriebe positiv beeinflussen.

In vernetzten und verteilten Systemen wie der Kraftfahrzeugelektronik können die Ursachen für die meisten möglichen Fehler nur mit Hilfe gesamtheitlicher und systemübergreifender Diagnosekonzepte sicher erkannt werden [Tap04]. Die unterschiedlichen im Fahrzeug verbauten Systeme besitzen zahlreiche gemeinsame Berührungspunkte. Dazu gehören vor allem die funktionalen Abhängigkeiten der einzelnen Systeme und die dadurch notwendige Vernetzung der zugehörigen Steuergeräte miteinander. Das bedeutet, dass viele Systeme auf Daten anderer Systeme (z.B. Sensordaten oder berechnete Werte) zurückgreifen müssen, um ihre Funktion zu erfüllen. Die Auswirkungen von Störungen in solchen verteilten Systemen sind vielfach nur schwer zu überschauen.

Um bei einer Störung von den beobachteten Fehlersymptomen auf Fehlerursachen schließen zu können, muss Wissen über das System sowie die Auswirkungen möglicher Fehler angewendet werden. Dieses Wissen wird als Diagnosewissen bezeichnet (vgl. [PZMH01]). In der Tabelle 1.1 werden verschiedene Arten von Diagnosewissen anhand von Beispielen dargestellt. Heutige Diagnosesysteme können nur einen Teil des in Tabelle 1.1 dargestellten Diagnosewissens sinnvoll verarbeiten. Sowohl die Verarbeitung der drei Arten von unscharfem Wissen als auch die Verarbeitung von fahrzeugindividuellem Faktenwissen ist nur sehr rudimentär möglich (im Kapitel 3 werden die Defizite ausführlich analysiert).

Typischerweise verwenden heutige Diagnosesysteme hinterlegtes Expertenwissen. Das bedeutet, dass sie situationsabhängig von Experten erstellte Informationen, z. B. zur Durchführung bestimmter Prüfungen, anzeigen. Die Intelligenz des Systems liegt dadurch nicht im Diagnosesystem selbst, sondern beim Experten, der die Prüfanweisungen erstellt. Die Prüfanweisungen sind in der Regel relativ allgemein gehalten, damit sie nach Möglichkeit für alle Varianten eines Fahrzeugs verwendet werden können. In Zukunft ist davon auszugehen, dass vermehrt intelligente Diagnosesysteme zum Einsatz kommen. Bei dieser Art von Systemen liegt ein signifikanter Teil

¹Das KFZ-Gewerbe hat auf Grund der gesteigerten Anforderungen die Berufsausbildung zum bzw. zur KFZ-Mechatroniker/in, sowie zum bzw. zur KFZ-Service-Techniker/in eingeführt (vgl. [Han03]). In der vorliegenden Arbeit wird jedoch der im Sprachgebrauch übliche Begriff „Mechaniker“ in der männlichen Form verwendet.

Art des Diagnosewissens	Beispiel
Faktenwissen	
technisches Allgemeinwissen	Physik, Elektrik, allgemeine Funktion von Fahrzeugsystemen
baureihenspezifisches Wissen	Kenntnis darüber, wie ein bestimmtes System in einer Fahrzeugbaureihe (z. B. VW Golf VI) umgesetzt ist.
fahrzeugindividuelles Wissen	im konkreten Fahrzeug verbaute Systeme (Fahrzeugvariante, Ausstattung), Fahrzeughistorie
fallspezifisches Wissen	Symptome des aktuellen Fehlerfalls, durchgeführte Prüfungen, sowie deren Ergebnis
unscharfes Wissen	
Erfahrungen	typische Fehlerursache bei bestimmten Symptomen und Fahrzeugbaureihen
mögliche Fehlerkandidaten	Bauteile, welche auf Grund eines Defekts die vorhandenen Fehlersymptome erklären könnten
sinnvolle Prüfschritte	Prüfschritte, die auf Grund des aktuellen Wissensstandes durchgeführt werden sollten, um der Identifikation der Fehlerursache näher zu kommen

Tabelle 1.1.: Verschiedene Arten von Diagnosewissen anhand von Beispielen

der Intelligenz im Diagnosesystem selbst. Systeme dieser Art können wesentlich besser mit fahrzeugindividuellem Wissen umgehen als Systeme, die lediglich hinterlegtes Expertenwissen zur Anzeige bringen.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Diagnose elektrischer Systeme im Fahrzeug. Unter fahrzeugindividuellem Wissen wird daher vor allem die exakte Beschreibung aller im konkreten Fahrzeug verbauten elektrischen Komponenten verstanden.

Zur Verarbeitung von unscharfen Wissen in Diagnosesystemen bieten sich vor allem wahrscheinlichkeitsbasierte Verfahren an. Dadurch lassen sich z.B. Antworten auf folgende Fragen darstellen:

- Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Bauteil die Ursache für den vorliegenden Fehler ist?
- Welche der möglichen Prüfungen führt am ehesten zur Identifikation der Fehlerursache?
- Welche Auswirkungen hat das Ergebnis einer bestimmten Prüfung auf die Menge der möglichen Fehlerursachen?

1.1 Fragestellung und Ziel der Arbeit

Der Einsatz wahrscheinlichkeitsbasierter Verfahren zur Diagnose elektrischer Systeme, vor allem im Fahrzeug, wurde bisher nur unzureichend untersucht (vgl. Abschnitt 1.2). Es wird vermutet, dass wahrscheinlichkeitsbasierte Verfahren einen signifikanten Beitrag zur Entwicklung intelligenter Diagnosesysteme leisten können. In der vorliegenden Arbeit soll folgende Frage beantwortet werden:

Leitfrage:

Kann durch den Einsatz wahrscheinlichkeitsbasierter Verfahren und gezielter Verarbeitung von fahrzeugindividuellem Wissen die Effizienz von Diagnosesystemen verbessert werden?

Um diese Frage beantworten zu können, wird zunächst definiert, was unter einem effizienten Diagnosesystem verstanden wird.

Definition effizientes Diagnosesystem: In der vorliegenden Arbeit wird unter einem effizienten Diagnosesystem ein System verstanden, mit dem die Ursache einer

vorhandenen Störung mit minimalem Ressourceneinsatz identifiziert werden kann.
Die notwendigen Ressourcen beinhalten:

- Anzahl der notwendigen Prüfschritte bis zur Ermittlung der Fehlerursache
- Aufwand für die Durchführung der Prüfschritte
- Aufwand zur Erstellung und Pflege der Wissensbasis des Diagnosesystems
- Kosten des Systems (Investition und laufende Kosten)

Das Ziel der Arbeit ist es, neue Verfahren für den Einsatz in einem intelligenten Diagnosesystem zu entwickeln und zu erproben. Dafür wird folgendermaßen vorgegangen:

1. Analyse ausgewählter Probleme des zurzeit bei der Volkswagen AG eingesetzten Systems
2. Ableitung von Anforderungen an neue Verfahren zur Lösung der Probleme mit einem intelligenten Diagnosesystem
3. Entwicklung und Beschreibung der Verfahren
4. Implementierung der Verfahren und Test der Implementierungen gegen die Anforderungen
5. Entwicklung eines intelligenten Diagnosesystems unter Verwendung der beschriebenen Verfahren
6. Vergleich des intelligenten Diagnosesystems mit dem bestehenden Diagnosesystem durch eine Konzeptbewertung und praktische Erprobung

An Hand des Punktes 6 kann gezeigt werden, wie sich die Lösung der identifizierten Probleme mit Hilfe der entwickelten Verfahren auf die Effizienz des Diagnosesystems auswirkt. Dadurch kann am Ende der Arbeit die Leitfrage beantwortet werden.

1.2 Abgrenzung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Diagnose elektrischer Fahrzeugsysteme. Die Ergebnisse lassen sich vermutlich auf die Diagnose anderer elektrischer Systeme übertragen, dies steht jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit. Die Fahrzeugdiagnose umfasst typischerweise neben den elektrischen Systemen auch mechanische und mechatronische Systeme. Auf Grund der besonderen Bedeutung der elektrischen und elektronischen Systeme im Fahrzeug wurde der Fokus der Arbeit ausschließlich darauf gelegt.

Die Problemstellung – die Entwicklung eines intelligenten Diagnosesystems – ist weder neu noch trivial. In der Literatur sind bereits verschiedene Verfahren zur Lösung von Problemen aus diesem Umfeld beschrieben.

Die in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren bauen teilweise auf anderen Arbeiten auf oder sind dadurch zumindest inspiriert. An den jeweiligen Stellen im Text wird auf die entsprechenden Quellen hingewiesen. Besonders hervorzuheben sind vor allem die folgenden Quellen:

In [Lük03] ist ein wahrscheinlichkeitsbasiertes System zur Fehlererkennung in Fahrzeugen beschrieben, das mit Hilfe von Bayes-Netzen das dynamische Verhalten des Systems überwacht und Abweichungen zum Nominalverhalten erkennt. In [SEB⁺a] und [SEB⁺b] wird ein Verfahren beschrieben, mit dem es möglich ist, aus der elektrischen Strukturbeschreibung eines Fahrzeugs Wirkketten zu extrahieren und mit deren Hilfe eine Fehlerkandidatenermittlung durch logisches Schließen innerhalb der Wirkketten durchzuführen. Im Abschnitt 4.2.3 dieser Arbeit wird das Verfahren aufgegriffen und beschrieben.

In [Tap04] wird ein sechsstufiges intelligentes Diagnosesystem beschrieben. Die einzelnen Stufen verwenden jeweils unterschiedliche Verfahren und bauen aufeinander auf. Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Verfahren könnten in eine solche Architektur integriert werden. In [Har07] wird der Einsatz von Diagnosesystemen und verschiedener Verfahren im Fahrzeug-Lebenszyklus untersucht. Ein Schwerpunkt liegt dabei in der Ableitung des notwendigen Diagnosewissens (Modelle und Daten) aus den Informationen der Fahrzeugentwicklung und der Beherrschung der Variantenvielfalt. Ergebnisse der beiden letztgenannten Arbeiten sind u. a. in die Problemanalyse (Kapitel 3) sowie die Anforderungsdefinitionen zu Beginn der Kapitel 4, 5 und 6 der vorliegenden

Arbeit eingegangen. Die Ergebnisse der in [Har07] beschriebenen Strukturanalyse können darüber hinaus als Eingangsgrößen für die Verfahren von Kapitel 4 und 5 dieser Arbeit verwendet werden. In den genannten Kapiteln wird darauf genauer eingegangen.

In einigen Werken der Volkswagen AG wird zurzeit das Diagnosesystem *Intelligent Finder* erprobt. Dieses System zählt ebenfalls zur Klasse der intelligenten Diagnosesysteme. Das dem System zugrunde liegende Prinzip ist in [SEB⁺a] und [SEB⁺b] beschrieben. Es verwendet eine fahrzeugspezifische Beschreibung der elektrischen Systeme und kann durch logisches Schließen Fehlerkandidaten ermitteln bzw. ausschließen. Im Kapitel 4 wird auf die Funktion sowie die verwendeten Daten eingegangen. Das in dieser Arbeit beschriebene System kann die gleichen Eingangsdaten verarbeiten.

Andere bekannte Verfahren aus dem Umfeld der intelligenten Fahrzeugdiagnose werden in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt. Dazu gehören erstens Verfahren, die auf Expertenwissen basieren und dieses verarbeiten und zweitens Verfahren, die auf Falldaten (Wissen über erfolgreiche Reparaturvorgänge) basieren. Diese Arten von Diagnoseverfahren stehen nicht im Fokus der Arbeit.

1.3 Inhalt der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines intelligenten Diagnosesystems, das nicht auf hinterlegtem Expertenwissen basiert, sondern selbständig einen Weg zur Identifikation des fehlerverursachenden Bauteils findet. Dabei wird fahrzeugindividuelles Wissen in Form von Beschreibungen elektrischer Fahrzeugsysteme verarbeitet. Mit Hilfe von wahrscheinlichkeitsbasierten Verfahren werden mögliche Fehlerkandidaten ermittelt und anschließend sinnvolle Prüfungen generiert und ausgegeben. Die Ergebnisse der Prüfungen werden vom beschriebenen Diagnosesystem selbständig interpretiert und zur Ermittlung des fehlerverursachenden Bauteils herangezogen.

Im Anschluss an diese Einleitung wird im Kapitel 2 der Stand der Technik erklärt. Im Kapitel 3 werden ausgewählte Probleme des zurzeit bei der Volkswagen AG eingesetzten Diagnosesystems analysiert. Darüber hinaus werden Ziele definiert, wie diese Probleme in einem neuartigen, intelligenten Diagnosesystem gelöst werden können. Am Ende des Kapitels 3 werden Kriterien definiert, mit denen geprüft werden kann, ob die Ziele erreicht wurden.

Die Kapitel 4, 5 und 6 sind strukturell gleich aufgebaut. Im Kapitel 4 wird die Entwicklung eines Verfahren zur wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung beschrieben. Das Kapitel 5 behandelt die Entwicklung eines Verfahrens zur individuellen Generierung von Prüfschritten. Das Kapitel 6 beschreibt schließlich die Entwicklung eines Verfahren für einen dynamischen Prüfablauf. Zu Beginn dieser drei Kapitel erfolgt jeweils eine Analyse der Anforderungen an das betreffende Verfahren. Im Anschluss daran erfolgt die Beschreibung der technischen Lösung. Am Ende der drei Kapitel werden Ergebnisse ausgewählter Tests, welche mit einer softwaretechnischen Umsetzung der Verfahren durchgeführt wurden, dokumentiert.

Die vollständige Beschreibung der Testfälle sowie die Ergebnisse der durchgeführten Tests einschließlich deren Interpretation sind im Anhang A der Arbeit abgedruckt.

Mit Hilfe der entwickelten und implementierten Verfahren wurde ein prototypisches Diagnosesystem realisiert. Dieses wird im Kapitel 7 einer vergleichenden Evaluierung unterzogen. Dabei wird es aus drei verschiedenen Blickwinkeln mit dem zurzeit verwendeten Diagnosesystem verglichen. Das Kapitel 8 fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt Anregungen für weiterführende Arbeiten.

2. | Stand der Technik

In der Automobilindustrie hat in den vergangenen 20 Jahren ein Paradigmenwechsel stattgefunden. Während Fahrzeugbau sowie die Wartung und Instandsetzung früher fast ausschließlich durch mechanische Systeme geprägt waren, werden seit den 1990er Jahren die meisten Innovationen im Fahrzeug durch oder mit Hilfe von elektronischen Systemen und Software realisiert. Von Mechanikern in KFZ-Werkstätten wird heute verlangt, dass sie Störungen in verteilten Funktionen vernetzter Steuergeräte finden und beheben können, dass sie die Software der Fahrzeuge aktualisieren und auf Wunsch des Kunden neue Funktionen nachrüsten können. Damit Mechaniker diese Aufgaben erfüllen können, ist es notwendig, ihnen entsprechende Werkzeuge an die Hand zu geben. Zu diesem Zweck werden leistungsfähige Diagnosesysteme entwickelt, die im Allgemeinen zwei Aufgaben erfüllen:

1. Unterstützung bei der Fehlersuche und Instandsetzung
2. Auslesen und Verändern von Informationen bzgl. vorhandener Hard- und Software

Nach einer kurzen Vorstellung der Technik vernetzter Fahrzeugsysteme wird im Abschnitt 2.1 das Themengebiet der Fahrzeugdiagnose eingeführt und der Stand der Technik in diesem Bereich dargestellt. Der Abschnitt 2.2 beschreibt mit den Bayes-Netzen eine Technik, die im Rahmen der Arbeit verwendet wurde, um ein neuartiges Diagnoseverfahren zu entwickeln.

Vernetzte Fahrzeugsysteme

Die Funktionalität der Fahrzeugelektronik wird durch unterschiedliche Steuergeräte, Sensoren und Aktoren realisiert. Steuergeräte, sowie ein Teil der Sensoren und Aktoren im Fahrzeug, sind eingebettete Rechnersysteme, die typischerweise Mikrocontroller, Speicher und Kommunikationsschnittstellen sowie spezifische Hardware zum Ausführen der jeweiligen Funktion besitzen. Die Funktionalität dieser Systeme wird maßgeblich durch ihre Software bestimmt. Viele Funktionen moderner Fahrzeuge lassen sich nur durch eine Vernetzung der Steuergeräte untereinander realisieren. Abhängig von der Art der zu realisierenden Funktionen und der damit verbundenen Anforderungen an das Kommunikationssystem kommen dafür neben dem CAN¹ verschiedenen spezialisierte Kommunikationssysteme wie LIN² zum Anschluss von Sensoren und Aktoren an ein Steuergerät, FlexRay für verteilte Echtzeitanwendungen mit erhöhten Kommunikationsanforderungen oder MOST³ zur Übertragung von Audio- und Videodaten zum Einsatz. Ein weiterer Berührungspunkt der Fahrzeugsysteme untereinander ist die Energieversorgung über die Fahrzeugbatterie und den Generator.

2.1 Fahrzeugdiagnose

Die Fahrzeugdiagnose hat die Aufgabe, Fehler im Fahrzeug sicher zu erkennen und bei der Ermittlung der Fehlerursache sowie dessen Beseitigung zu unterstützen. Bei der Fahrzeugdiagnose unterscheidet man zwischen On-Board-Diagnose und Off-Board-Diagnose. Die On-Board-Diagnose ist Bestandteil jedes Fahrzeugs und hat die Aufgabe, Fehler zu erkennen, während

¹CAN – engl. Controller Area Network

²LIN – engl. Local Interconnect Network

³MOST – engl. Media Oriented Systems Transport

	<i>On-Board-Diagnose</i>	<i>Off-Board-Diagnose</i>
Ziel	Fehlererkennung	Fehlerlokalisierung/beseitigung
Zeitpunkt	Im Fahrbetrieb ständig aktiv	wird im Bedarfsfall temporär an das Fahrzeug angeschlossen
Eingang	Prozessgrößen wie Ströme, Spannungen oder Sensorsignale	Ereignisspeichereinträge, Eingaben des Mechanikers z. B. Messergebnisse
Ausgang	Ereignisspeichereinträge, Warnlampen, Notlauf	Anweisungen zum Eingrenzen der Fehlerursache
Randbedingungen	geringe Rechenleistung im Steuergerät, i. d. R. kein HMI ^a (in einigen Fällen eine Warnlampe o.ä.), Fahrer braucht i. d. R. nicht zu wissen, dass diese Funktion existiert	Leistungsfähiges System i. d. R. auf PC-Basis, Umfangreiches HMI, Anwender ist speziell geschult

^aHMI – Human Machine Interface dt. Benutzerschnittstelle des Systems

Tabelle 2.1.: Unterscheidung zw. On- und Off-Board-Diagnose

<i>Funktion</i>	<i>On-Board-Diagnose</i>	<i>Off-Board-Diagnose</i>
Fehlererkennung	×	
Fehlerreaktion	×	
Ermittlung der Fehlerursache		×
Unterstützung der Instandsetzung		×
Update Programmierung (Flashen)	×	×
Lesen und Ändern der Steuergerätekonfiguration	×	×

Tabelle 2.2.: Funktionen der Fahrzeugdiagnose

sie auftreten. Dies ist z.B. nötig, um den Fahrer zu warnen, ein System in einen sicheren Zustand zu bringen und abzuschalten oder einen Notlauf zu initiieren. Die On-Board-Diagnose hat auch die Aufgabe, Informationen für eine spätere Fehlersuche in der Werkstatt in Form von Ereignisspeichereinträgen zu speichern und zur Verfügung zu stellen. Unter Off-Board-Diagnose werden Systeme verstanden, die im Bedarfsfall an ein Fahrzeug angeschlossen werden können. Sie sollen bei der Identifikation der Fehlerursache und der Instandhaltung unterstützen. Diese Systeme können die im Fahrzeug gespeicherten Diagnoseinformationen auslesen und in verständlicher Form anzeigen. Moderne Diagnosesysteme sollen darüber hinaus den Mechaniker bei der Suche nach der Fehlerursache aktiv unterstützen, indem sie ihm sinnvolle Prüfschritte vorschlagen und ihn mit problemspezifischen Zusatzinformationen versorgen. Die Tabelle 2.1 zeigt die Unterschiede zw. der On- und der Off-Board-Diagnose.

Die Tabelle 2.2 stellt die wichtigsten Funktionen der On-Board-Diagnose sowie der Off-Board-Diagnose dar. Die Funktionen werden in den Abschnitten 2.1.1 und 2.1.3 beschrieben. Im Folgenden werden einige häufig verwendete Begriffe eingeführt.

Diagnose: (griechisch: unterscheidende Beurteilung, Erkenntnis) ist laut [DUD05] der Vorgang der Erkenntnisgewinnung auf Grund genauerer Beobachtungen, Untersuchungen abgegebener Feststellungen und Beurteilung über den Zustand bzw. der Beschaffenheit von etwas (z. B. von einer Krankheit).

Am häufigsten wird der Begriff in der Medizin (medizinische Diagnose) verwendet, wo er die Erkennung einer Krankheit oder Verletzung (Kategorie) auf Grund von Symptomen und/oder Zeichen (Phänomene) bezeichnet. Im Bereich der Fahrzeugtechnik (technische Diagnose) umfasst der Begriff Fahrzeugdiagnose nicht nur die Erkenntnisgewinnung, sondern auch deren Verarbeitung und Speicherung. Das Ziel der Fahrzeugdiagnose ist das Finden der Ursachen für die Phänomene. Dazu gehören

auch Maßnahmen zur Untersuchung des Fahrzeugs sowie zur Betrachtung der Umgebungsbedingungen und der Vorgeschichte.

Diagnosetiefe: Der Begriff Diagnosetiefe wird im Folgenden als ein Maß für die Granularität der vom Diagnosesystem unterscheidbaren Teilsysteme, die als Fehlerursache in Frage kommen verwendet (vgl. [Hei06]). Um eine präzise Aussage bezüglich der Fehlerursache machen zu können, ist eine möglichst große Diagnosetiefe notwendig. Idealerweise sollte das Diagnosesystem zwischen allen tauschbaren Komponenten klar differenzieren können. Eine noch größere Diagnosetiefe, die z. B. einzelne Bauteile innerhalb einer abgeschlossenen, tauschbaren Komponente differenzieren kann, ist für eine erfolgreiche Reparatur nicht notwendig, da defekte Komponenten normalerweise komplett ausgetauscht und nicht repariert werden.

Fehlerkandidat: Ein Fahrzeug besteht aus einer Vielzahl unterschiedlicher Komponenten. Ein Fehler bzw. eine Störung liegt i. d. R. im Defekt einer oder mehrerer dieser Komponenten begründet. Solange das/die tatsächlichen fehlerverursachenden Bauteile noch nicht eindeutig bekannt sind, wird im Rahmen dieser Arbeit von möglichen Fehlerkandidaten gesprochen. Fehlerkandidaten sind dementsprechend Bauteile, die durch einen in sich selbst liegenden Defekt die aktuelle Fehlersituation hervorgerufen haben könnten. Die Granularität der Fehlerkandidaten entspricht in dieser Arbeit immer der kleinsten tauschbaren Einheit. Ein Fehlerkandidat kann z. B. ein Steuergerät, eine Leitung oder ein Stecker sein.

Fehlerwahrscheinlichkeit: Unter Fehlerwahrscheinlichkeit wird im Folgenden die Wahrscheinlichkeit verstanden, dass ein Fehlerkandidat in einer Fehlersituation tatsächlich defekt ist (fallspezifisches Wissen vgl. Tabelle 1.1). Wenn sich z. B. eine bestimmte Fehlersituation nur durch den Ausfall einer ganz bestimmten Komponente (ein Fehlerkandidat) erklären lässt und diese Fehlersituation vorliegt, beträgt die Fehlerwahrscheinlichkeit für diese Komponente 1,0.

Ausfallwahrscheinlichkeit: Unter der Ausfallwahrscheinlichkeit (auch Defektwahrscheinlichkeit) einer Komponente wird die Wahrscheinlichkeit verstanden, mit der eine bestimmte Komponente zum Betrachtungszeitpunkt defekt ist. Ähnlich wie die Ausfallrate, ist die Ausfallwahrscheinlichkeit typischerweise abhängig vom Alter der Komponente und ist baureihenspezifisch (vgl. Tabelle 1.1). Die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Komponente ist unabhängig davon, ob ein Fehler vorliegt (nicht fallspezifisch). Die Ausfallwahrscheinlichkeit wird typischerweise in % angegeben. In [BL04] werden die Bedeutung dieser statistischen Messgröße sowie Methoden beschreiben, um sie zu ermitteln.

Fehlerschauer: Die Auswirkungen eines Fehlers in einem Fahrzeug können sehr unterschiedlich ausfallen. Im einfachsten Fall löst ein Fehler genau ein charakteristisches Fehlersymptom aus. Es gibt jedoch auch Fehlersituationen, die mehrere unterschiedliche Fehlersymptome in verschiedenen Systemen eines Fahrzeugs hervorrufen. Dadurch entsteht der Eindruck, dass mehrere Fehler in einem Fahrzeug vorliegen. Dieses Phänomen wird im Folgenden als Fehlerschauer bezeichnet.

Mehrfachfehler: In den meisten Fällen wird davon ausgegangen, dass ein Fehler genau eine Ursache hat und dass die Fehlersymptome nicht mehr vorhanden sind, sobald diese Fehlerursache beseitigt ist. Da ein Fehler jedoch mehrere Ursachen haben kann, können auch mehrere Ursachen gleichzeitig vorliegen und zum gleichen charakteristischen Fehlerbild führen. Diese Art Fehler wird als Mehrfachfehler bezeichnet. Um einen solchen Mehrfachfehler abzustellen, müssen i. d. R. alle Fehlerursachen beseitigt werden. Ein Beispiel dafür ist z. B. eine elektrische Reihenschaltung, die an mehreren Stellen unterbrochen ist. Die Wahrscheinlichkeit eines Mehrfachfehlers ist

deutlich geringer als die eines Einfachfehlers. Bei der Auslegung von sicherheitsrelevanten Systemen muss vielfach beachtet werden, dass ein Einfachfehler nicht zu einer Gefährdung führt. Auch eine Toleranz von Zweifach- oder Dreifachfehlern kann erreicht werden. Ein genereller Schutz vor Mehrfachfehlern ist nicht möglich.

Folgefehler: Bestimmte Fehler können dazu führen, dass infolgedessen weitere Fehler auftreten. Diese Fehler werden als Folgefehler bezeichnet. Ein Beispiel dafür ist z.B. ein Kurzschluss in einer Komponente, der dazu führt, dass andere Komponenten beschädigt werden, was wiederum zu Fehlern führen kann.

2.1.1 On-Bord-Diagnose in Fahrzeugsystemen

Die Funktionalität der On-Board-Diagnose ist im Gegensatz zu den meisten anderen Funktionen für den Kunden im Normalfall nicht sichtbar. Sie ist jedoch in der Regel genauso wichtig wie die sichtbaren Funktionen eines Fahrzeugs ([Mah00]). Sowohl die Fehlererkennung als auch die Fehlerreaktion sind sehr spezifisch für das jeweilige Fahrzeugsystem bzw. die überwachte Funktion. Die beiden folgenden Beispiele zeigen den Einsatz der On-Board-Diagnose.

Beispiel 1: Airbags werden selten benötigt. Ein defekter Airbag würde voraussichtlich zu spät auffallen. Nun gibt es Möglichkeiten, zumindest die elektrischen Komponenten eines Airbags zu überprüfen, ohne ihn dabei auszulösen. Die kritischen Komponenten, wie die Zündvorrichtung sowie die Leitungen und Stecker, werden vom Steuergerät permanent mit Hilfe einer Widerstandsmessung überwacht. Sobald der gemessene Wert außerhalb des Toleranzbereiches liegt, wird von einem Fehler ausgegangen. Diese Überprüfung geschieht ständig während der Fahrt und der Fahrer wird im Falle eines Fehlers durch eine Warnlampe darauf aufmerksam gemacht. Zusätzlich legt das Airbagsteuergerät Diagnoseinformationen bezüglich des erkannten Fehlers in seinem Ereignisspeicher ab. In der Werkstatt können diese Informationen mit Hilfe der Diagnosekommunikation aus dem Airbagsteuergerät ausgelesen werden. Dadurch kann nachvollzogen werden, was die Ursache für die Störung war.

Beispiel 2: Es gibt weltweit eine Reihe gesetzlicher Vorschriften, die z. B. unter den Begriffen OBD-II⁴ und EOBD⁵ zusammengefasst sind. Die Vorschriften schreiben u. a. eine Überwachung aller Fahrzeugkomponenten vor, die für die Abgasqualität verantwortlich sind⁶. Bei der Erkennung eines Fehlers in diesen Systemen muss dieser dem Fahrer angezeigt und im zugehörigen Steuergerät abgespeichert werden, um später ausgelesen werden zu können. Die Diagnose abgasrelevanter Systeme ist in der ISO 1531-5 [ISO05a] bzw. der gleichlautenden SAE J1979 sowie der ISO 15765-4 [ISO04] und der ISO 14230-4 [ISO99] geregelt. Diagnosefunktionen, die über den gesetzlich vorgegebenen Mindestumfang hinausgehen, werden von den Automobilherstellern individuell umgesetzt.

Fehlererkennung

Die Aufgabe eines Steuergerätes besteht in den meisten Fällen in der Steuerung oder Regelung eines physikalischen Systems. Um Fehler zu erkennen, werden die an ein Steuergerät angeschlossenen Sensoren und Aktoren überwacht. So wird zum Beispiel erkannt, wenn ein Sensor einen Wert außerhalb des zulässigen Wertebereiches liefert. Dies lässt auf einen Defekt des Sensors, der elektrischen Verbindungen (Leitungen, Stecker) oder der Eingangsbeschaltung des Steuergerätes

⁴OBD-II — On-Board-Diagnose der zweiten Generation (für Nordamerika)

⁵EOBD — Euro-On-Board-Diagnose (für Länder der EU)

⁶Innerhalb der EU wird dies durch die Richtlinie 98/69/EG über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen ([Eur]) geregelt

schließen. Bei Aktoren ist es möglich, den fließenden Strom während der Ansteuerung zu überwachen. Es gibt aber auch Aktoren, die überwacht werden müssen, ohne dabei angesteuert zu werden. Beispiele dafür sind Zündvorrichtungen für Airbags und Gurtstraffer. Eine andere Möglichkeit ist die Überwachung der Aktoren durch zusätzlich vorhandene Sensoren. Ein Beispiel dafür ist die Überwachung der elektrischen Fensterheber. Wenn der Motor angesteuert wird, muss das Fenster nach einer bestimmten Zeit eine der beiden Endlagen erreichen. Ist dies nicht der Fall, ist entweder der Motor, die Mechanik oder die Endlagenerkennung defekt.

Es müssen auch wesentlich komplexere physikalische Systeme wie z. B. der Verbrennungsvorgang im Motor überwacht werden. Die Berechnung der Kraftstoff- und Luftmengen sowie der optimalen Einspritz- und Zündzeitpunkte erfolgt durch komplexe mathematische Modelle. Sensoren, die das Verhalten des Motors, die Zusammensetzung von Abgasen und der angesaugten Luft überwachen, versuchen permanent, das Verhalten des Motors zu plausibilisieren. Treten Abweichungen vom erwarteten Verhalten auf, können diese mit Hilfe der Modelle erkannt werden. In einigen Fällen lassen sich mit Hilfe der Modelle auch mögliche Fehlerursachen ermitteln. Diese Form der Diagnose wird als modellbasierte Diagnose bezeichnet (z. B. [Pfe99]).

Bei der Kommunikation zwischen den Steuergeräten können sehr unterschiedliche Fehler auftreten. Die zu Beginn des Kapitels beschriebenen Bussysteme bieten jeweils spezielle Verfahren zur sicheren Erkennung von Fehlerzuständen (physikalische Fehler und Netzwerkfehler) sowie Mechanismen zur Aufrechterhaltung einer gewissen Grundfunktionalität. CAN-Schnittstellen können z. B. Kurzschlüsse oder Leitungsunterbrechungen in einem Netzwerksegment erkennen. In einigen Fällen ist es möglich, beim Ausfall einer der beiden Datenleitungen in einen Eindrahtmodus zurückzufallen und über die verbleibende Leitung eine eingeschränkte Kommunikation aufrecht zu erhalten. Beim Ausfall einzelner Netzknoten in einem CAN-Netz können die verbleibenden Steuergeräte weiterhin kommunizieren. Der FlexRay ist auf Grund seiner optionalen Zweikanaligkeit besonders geeignet für sicherheitsrelevante Applikationen, da ausgewählte Daten redundant über beide Kanäle übertragen werden können. Fehler in der Bitübertragungsschicht (auch Mehrfachfehler) werden im FlexRay durch CRC-Prüfsummen erkannt. Bei zeitgesteuerten Bussen sind Timing-Fehler⁷ besonders kritisch. FlexRay-Kommunikationscontroller erkennen Abweichungen zwischen der eigenen Zeitbasis und der Zeitbasis anderer Kommunikationspartner und stellen ab einer bestimmten Differenz das Senden ein, um nicht die Kommunikation anderer Teilnehmer zu stören.

Neben der Überwachung der Datenbusse auf physikalischer Ebene können Steuergeräte i. d. R. auch Fehler ihrer Kommunikationspartner oder anderer Netzwerksegmente erkennen. Dies geschieht in drei Stufen:

1. Timeout-Überwachung
Bei Unterbrechung der Kommunikation über einen bestimmten Zeitraum wird von einem Ausfall des Partnersteuergerätes oder einer Unterbrechung der Kommunikationsverbindung ausgegangen.
2. syntaktische Überwachung
Vor allem sicherheitsrelevante Informationen bekommen eine Ende-zu-Ende-Absicherung in Form einer zusätzlichen CRC-Prüfsumme.
3. semantische Überprüfung
Durch inhaltliche Überprüfung der vom Kommunikationspartner übermittelten Daten auf Applikationsebene werden diese plausibilisiert.

Durch eine Kombination der verschiedenen Techniken können nahezu alle Kommunikationsfehler von den Steuergeräten erkannt werden (vgl. [Law00]).

Die Fehlererkennung erfolgt innerhalb eines Steuergerätes mit Hilfe von Diagnoseroutinen. Einige dieser Diagnoseroutinen werden nur in bestimmten Betriebszuständen (z. B. bei laufendem

⁷Timing-Fehler können z. B. durch Alterungserscheinungen von Quarzoszillatoren entstehen

Motor) ausgeführt. Andere Überwachungsfunktionen können erst ausgeführt werden, wenn die betreffende Funktion aktiviert bzw. der zugehörige Aktor angesteuert wird. Aus diesem Grund kann es passieren, dass ein vorhandener Fehler nicht zeitnah erkannt wird. In bestimmten Betriebszuständen werden gezielt bestimmte Diagnosefunktionen deaktiviert. Dies ist vor allem notwendig, wenn die Gefahr besteht, dass ein abnormales Verhalten erkannt wird, obwohl kein technischer Defekt vorliegt. Beispiele dafür sind z. B. eine zu geringe Bordspannung, ein Spannungseinbruch, während der Motor gestartet wird oder die Initialisierung und Deaktivierung der fahrzeuginternen Netzwerke. Würden die Diagnoseroutinen in diesem Fall trotzdem laufen, können sogenannte Phantomfehler entstehen, die in der Werkstatt unter Umständen zum Reparieren oder Ersetzen intakter Komponenten führen.

Fehlerreaktion

Wenn ein System einen möglichen Fehler erkannt hat, muss es darauf angemessen reagieren. Dazu können z. B. das Warnen des Fahrers bzw. das Geben von Hinweisen gehören. In vielen Fällen ist es darüber hinaus möglich, das betreffende System zu deaktivieren, um weiteren Schaden abzuwenden. Dies kann jedoch zu einem Verlust der Mobilität oder zu starken Komforteinschränkungen führen. Deshalb werden oft Ersatz- oder Notlauffunktionen aktiviert, die ein selbstständiges und sicheres Erreichen der nächsten Werkstatt ermöglichen und dennoch mögliche Folgeschäden vermeiden können. Eine wesentliche Reaktion auf einen erkannten Fehler ist dessen Dokumentation im Ereignisspeicher des Steuergerätes.

Die On-Board-Diagnose hat in den meisten Fällen eine geringe Diagnosetiefe. Sie ist normalerweise nicht in der Lage exakt das fehlerverursachende Bauteil zu identifizieren. Normalerweise ist das auch nicht notwendig, da das fehlerverursachende Bauteil in der Werkstatt durch zusätzliche Messungen und leistungsfähige Off-Board-Diagnosesysteme ermittelt werden kann. Für eine zuverlässige, eigenständige Erkennung des fehlerverursachenden Bauteils durch die On-Board-Diagnose wären in den meisten Fällen zusätzliche Sensoren und wesentlich aufwändigere Diagnosealgorithmen nötig. Im Bereich der Fahrzeugelektronik wird darauf in der Regel verzichtet.

Ereignisspeichereinträge

Damit der von einem Steuergerät erkannte Fehler später behoben werden kann, ist es notwendig, dass möglichst detaillierte Informationen über den erkannten Fehler und die Umstände, unter denen er aufgetreten ist, abgespeichert werden. Zu diesem Zweck besitzen Steuergeräte einen Ereignisspeicher (auch Fehlerspeicher genannt) in einem nichtflüchtigen Speicherbereich. Sobald ein für die Diagnose relevantes Ereignis eintritt, wird dort ein Hinweis abgelegt. Dies geschieht in Form von DTCs ⁸. In einer KFZ-Werkstatt kann ein an das Fahrzeug angeschlossener Diagnosetester auf alle Steuergeräte zugreifen und die Ereignisspeichereinträge auslesen und bei Bedarf löschen. Jedem DTC ist ein Fehlertext zugeordnet, der auf dem Diagnosetester in der passenden Landessprache angezeigt wird. Je nachdem, um was für ein Fahrzeugsystem es sich handelt, können für einen DTC neben Datum, Uhrzeit und Häufigkeit des Auftretens zusätzliche Messgrößen wie Geschwindigkeit, Drehzahlen, Temperaturen, Drücke und Spannungen abgelegt werden. Die Interpretation dieser Zusatzinformationen ermöglicht eine bessere Rekonstruktion der Fehlersituation.

Lesen und Ändern von Daten in Steuergeräten

Damit die Steuergeräte in einer konkreten Fahrzeugkonfiguration richtig funktionieren, müssen viele von ihnen während der Produktion und in der Werkstatt (z. B. beim Verbau eines Ersatzteils) über die Diagnoseschnittstelle konfiguriert werden. Dabei werden Daten in einen nichtflüchtigen Bereich des Speichers im Steuergerät geschrieben. Auch ein vollständiges Aktualisieren der Steuergerätesoftware (Updateprogrammierung oder Flashen) ist bei den meisten Steuergeräten möglich.

⁸DTC – Diagnostic Trouble Code oder auch Fehlercodes

Zugriff auf Sensoren und Aktoren

Eine wichtige Funktion für die Fehlersuche im Fahrzeug ist das Auslesen von Messwerten aus dem Steuergerät und das gezielte Ansteuern von Aktuatoren (Stellgliedtest). Dadurch können neben internen Mess-, Steuer- und Regelgrößen die von externen Sensoren eingelesenen Informationen angezeigt werden. Die Ansteuerung von Aktoren (bzw. den entsprechenden Ausgängen am Steuergerät) kann unabhängig von der eigentlichen Fahrzeugfunktion erfolgen. Vor allem in Verbindung mit Messungen an der Peripherie der Steuergeräte können durch diese Funktionen Fehler in der Sensorik, Aktorik sowie der Leitungen und Stecker gefunden werden.

2.1.2 Verbindung von On- und Off-Board-Diagnose

Zum Anschluss von Diagnosetestern und anderen Geräten, die auf steuergeräteinterne Diagnosefunktionen zugreifen müssen, sind alle aktuellen Fahrzeuge mit einer Diagnoseschnittstelle ausgerüstet. Der Anschluss ist von der ISO [ISO05a] standardisiert und auf Grund gesetzlicher Vorgaben zur On-Board-Diagnose bei allen PKW-Herstellern gleich. Die Kommunikation kann gemäß dieses Standards über verschiedene Datenbusse erfolgen. Der J1850 ist ein von der SAE [SAE01] standardisierter und in der Vergangenheit u. a. von Ford, General Motors und Chrysler verwendeter Datenbus. Bei den europäischen Autobauern hat sich in der Vergangenheit die K-Leitung [ISO89] durchgesetzt. Seit einiger Zeit wird der CAN-Bus [SAE02] eingesetzt. Seit 2008 müssen alle neuen Fahrzeuge über einen CAN-Bus diagnostiziert werden können. Vermutlich ab 2014 wird das aus dem PC- und IT-Bereich bekannte Ethernet schrittweise den CAN für die Diagnosekommunikation ablösen [ISO10]. Alle diagnosefähigen Steuergeräte sind direkt oder über ein Gatewaysteuergerät mit der Diagnoseschnittstelle verbunden.

Oberhalb der Kommunikationsschnittstellen liegt das eigentliche Diagnoseprotokoll, mit Hilfe dessen auf die spezifischen Diagnosedienste zugegriffen werden kann. Im Zusammenhang mit der K-Leitung wurde das Key-Word-Protokoll 2000 (KWP 2000) [ISO99] definiert und später für den Einsatz mit CAN [ISO04] erweitert. Unter dem Namen Unified Diagnostic Services (UDS) [ISO05b] wurde ein leistungsfähigeres Diagnoseprotokoll eingeführt, welches vom darunter liegenden Bus unabhängig ist und verschiedene Nachteile älterer Protokolle beseitigt (vgl. [ZS07]).

Anbindung von Diagnoseapplikationen über ASAM MCD und ODX

Über die Diagnoseschnittstelle können vielfältige Informationen mit den Steuergeräten im Fahrzeug ausgetauscht werden. Abhängig von der Art des Steuergerätes stellt es unterschiedliche Dienste zur Verfügung. Damit eine Diagnoseapplikation, z. B. ein Off-Bord-Diagnosesystem, mit beliebigen Steuergeräten kommunizieren kann, musste es in der Vergangenheit genau auf die zu diagnostizierenden Steuergeräte abgestimmt sein. Um diesen Nachteil zu umgehen, wurde vom europäischen Industriekonsortium ASAM⁹ der MCD-Standard entwickelt, der mittlerweile von vielen Fahrzeugherstellern eingesetzt wird. Mit diesem Standard sollen Messungen (engl. **M**asure), Anpassungen steuergeräteinterner Parameter (engl. **C**alibration) und Diagnose (engl. **D**iagnosis) vereinfacht und vereinheitlicht werden, so dass auch Werkzeuge unterschiedlicher Hersteller miteinander kombiniert werden können.

Von der ASAM wurde unter anderem ein „ASAM MCD 3D Server“ definiert. Dies ist ein Softwaremodul, das auf einem Diagnosesystem (Tester) unterhalb der eigentlichen Diagnoseapplikation läuft und das Pendant zu den Diagnosediensten in den Steuergeräten darstellt. Die Abbildung 2.1 stellt die Integration dieses Softwaremoduls in ein Diagnosesystem dar. Für die Diagnoseapplikation wird mit der „MCD 3D API“ eine generische Programmierschnittstelle angeboten, über die auf alle Steuergeräte unabhängig von den umgesetzten Protokollen und Diensten zugegriffen werden kann.

⁹ASAM – Association for Standardization of Automation and Measuring Systems

Um diese Schnittstelle zu bedienen, greift der ASAM MCD Server über die standardisierte *MCD1* Schnittstelle auf ein Diagnoseinterface¹⁰ zu, das die Kommunikation mit dem Fahrzeug über die im letzten Abschnitt beschriebenen Protokolle erledigt. Über die *MCD2* Schnittstelle greift der MCD Server auf Steuergerätebeschreibungsdaten im ASAM-ODX¹¹ Format zu. Diese beschreiben, wie die Kommunikation mit dem Steuergerät funktioniert und wie der MCD Server die generische *MCD3D* Schnittstelle für ein konkretes Steuergerät bedienen muss. Eine ODX-Datei enthält für ein bestimmtes Steuergerät u. a. folgende Informationen:

- zu verwendende Diagnoseprotokolle und Schnittstellen
- unterstützte Diagnosedienste
- detaillierte Informationen über das Steuergerät
- alle erkennbaren Fehler (teilweise mit Zusatzinformationen)
- Methoden zum Überführen der DTCs in natürlichsprachliche Fehlertexte
- verfügbare Messwertblöcke
- Umrechnungen, Bezeichnungen und Einheiten zur Ausgabe physikalischer Größen
- verfügbare Stellgliedtests
- Berechnung von Codierungen (Variantenkonfiguration) sowie
- Verfahren zur Updateprogrammierung (Flashen) einschließlich der Flashdaten.

Diese Informationen werden von den Entwicklern der Steuergeräte in eine entsprechende ODX-Datei (XML-Dokument) eingetragen. Dieser Vorgang wird als Bedatung bezeichnet. Die ODX-Datei kann auch weitere Informationen zu den einzelnen Diagnosefunktionen enthalten. Ein Beispiel dafür sind Fehlerersatzbedingungen. Diese beschreiben, was genau eine Diagnosefunktion überwacht und was passieren muss, damit ein DTC im Steuergerät abgelegt wird.

Die MCD 3D Schnittstelle ist u. a. in [ASA05a], [ASA05b] beschrieben. Die MCD 2D Schnittstelle mit dem ODX-Format ist u. a. in [ASA06] beschrieben und von der ISO standardisiert [ISO06b]. Die MCD 1 Schnittstelle ist ebenfalls von der ISO standardisiert [ISO06a].

Die ODX-Daten in einem Diagnosesystem (vgl. Abbildung 2.1) sind in Fahrzeugprojekte aufgeteilt. Dabei existiert zu jedem Steuergerät eine eigene ODX-Datei. Über regelmäßige Updates der Diagnosesysteme in den Werkstätten werden die Diagnosesysteme mit allen relevanten ODX-Daten versorgt. Sobald das Diagnosesystem das betreffende Fahrzeugprojekt kennt, liest es aus den ODX-Daten, wie es mit dem Fahrzeug und den einzelnen Steuergeräten kommunizieren

¹⁰Durch die offengelegte Schnittstelle gibt es mittlerweile eine Vielzahl von Diagnoseinterfaces (VCIs für engl. Vehicle Communication Interfaces) unterschiedlicher Hersteller

¹¹ODX – engl. Open Diagnostic Exchange

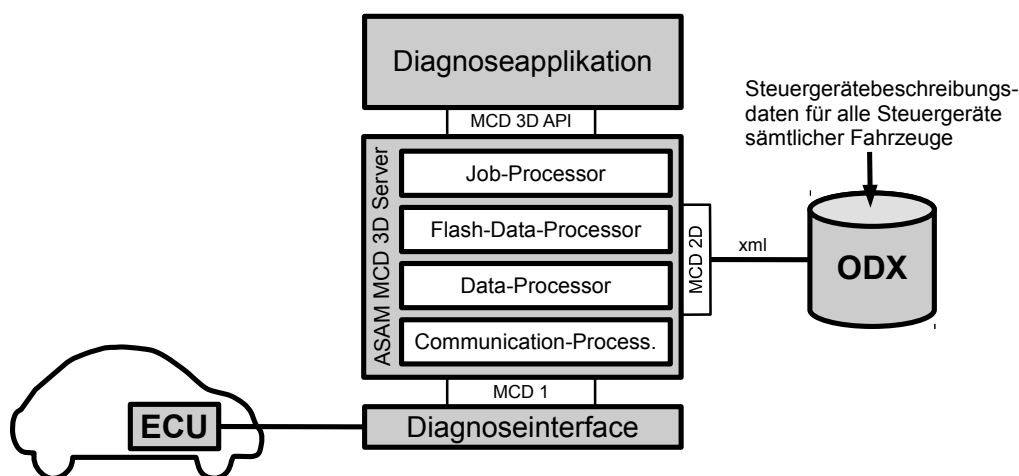


Abbildung 2.1.: Einsatz eines ASAM MCD 3D Servers in einem Diagnosesystem

muss. Dem Diagnosesystem ist dadurch auch bekannt, welche Steuergeräte sich im Fahrzeug befinden können und wie die grundlegende Kommunikation mit diesen Steuergeräten funktioniert. Diese Informationen sind in den ODX-Daten als Basis-Variante zu dem Steuergerät abgelegt. Über die Kommunikation mit Hilfe der Basis-Variante können essentielle Informationen – vor allem die genaue Bezeichnung der im konkreten Fahrzeug verbauten ECU-Variante – aus dem Steuergerät gelesen werden. Daraufhin kann das Diagnosesystem den passenden ODX-Datensatz (ECU-Variante) laden. Danach ist das System für die Kommunikation mit dem Steuergerät optimal konfiguriert und kann auf alle Diagnosefunktionen im Steuergerät zugreifen.

2.1.3 Off-Board-Diagnosesysteme

Off-Board-Diagnosesysteme werden sowohl in Werkstätten zur Instandsetzung als auch in der Fahrzeugproduktion zur Inbetriebnahme von Fahrzeugen verwendet. Die Systeme sind in der Regel wesentlich leistungsfähiger als die Steuergeräte, in denen die On-Board-Diagnose umgesetzt ist. Off-Board-Diagnosesysteme haben die Aufgabe, eine Benutzerschnittstelle für die On-Board-Diagnose zur Verfügung zu stellen. Die einfachste Form solcher Diagnosesysteme sind die OBD-Scantools. OBD-Scantools gibt es in Form eines PC-Interfaces (typischerweise mit USB-Anschluss) mit zugehöriger Software oder als PC-unabhängiges Gerät mit eigenem Display und Bedienelementen. Der Anwender kann mit Hilfe solcher Systeme auf alle Diagnosefunktionen der Steuergeräte zugreifen. So können z.B. Ereignisspeichereinträge oder andere Informationen ausgelesen und in der jeweiligen Landessprache angezeigt werden.

Die erweiterten Off-Bord-Diagnosefunktionen leistungsfähigerer Diagnosesystemen haben die Aufgabe, den Mechaniker bei der Fehlersuche aktiv zu unterstützen. Das bedeutet unter anderem, dass sie dem Mechaniker sinnvolle Prüfungen vorschlagen und am Ende die fehlerhafte Komponente und mögliche Reparaturempfehlungen ausgeben. Diagnosesysteme dieser Art fallen in die Kategorie der wissensbasierten Systeme [GRS00]. In den meisten Fällen kommt dafür Expertenwissen zum Einsatz. In diesem Fall wird das Diagnosewissen von Experten (Menschen) in das System eingegeben und vom Diagnosesystem angewendet. In [Pup90] wird detailliert auf Expertensysteme sowie auf deren Vor- und Nachteile eingegangen.

Neben der Wissensbasis benötigt ein wissensbasiertes Diagnosesystem eine Inferenzmaschine. Diese Softwarekomponente ist in der Lage, durch Schlussfolgerungen Aussagen auf Grund der Symptome aus der Wissensbasis abzuleiten. Es existieren verschiedene Diagnoseverfahren, welche sich jeweils in der Art der Wissensbasis als auch im Algorithmus der Inferenzmaschine unterscheiden. Im Folgenden werden einige Verfahren zur wissensbasierten Diagnose vorgestellt:

Regelbasierte Diagnosesysteme

Regelbasierte Systeme stellen die einfachste und auch älteste Form wissensbasierter Systeme dar und wurden bereits in den 1980er Jahren eingesetzt (vgl. [BS84]). Die Wissensbasis dieser Systeme besteht aus einer Sammlung von Regeln.

Beispiel:

Wenn DTC "Unterbrechung Zünder Airbag" vorhanden und gemessener Widerstand am Zünder größer als 1M Ω ist,
dann ist Bauteil Airbag defekt.

Ein Diagnosesystem dieser Art kann nur dann unterstützend wirken, wenn für genau den vorliegenden Fall ein Satz Regeln erstellt wurde, der das vorliegende Problem beschreibt. Die Wissensbasis dieser Systeme wird in den meisten Fällen von Experten manuell erstellt und kann bereits für die Diagnose sehr einfacher Systeme sehr umfangreich sein, da alle Fehlerzustände und die zugrundeliegende Ursache definiert werden müssen. Wenn davon ausgegangen werden muss, dass in einem System mehr als ein Fehler gleichzeitig auftreten kann, sind regelbasierte Systeme in den meisten Fällen nicht mehr sinnvoll einsetzbar. Die Ursache dafür ist, dass sich die Symptome der Einzelfehler überdecken und dadurch ein Fehlerbild entsteht, welches sich von den jeweiligen

Einzel Fehlern unterscheidet. Damit das Diagnosesystem mit mehreren gleichzeitig auftretenden Fehlern umgehen kann, müssten Regeln für alle Fehlerkombinationen erstellt werden. Auch die Variantenvielfalt der Fahrzeuge ist in einem regelbasierten System kaum abbildbar, da ein Satz von Regeln i. d. R. nur für genau eine Variante verwendet werden kann.

Geführte Fehlersuche (GFS)

Die GFS ist ein Diagnosesystem, welches in allen Vertragswerkstätten der Volkswagen AG eingesetzt wird. Es stellt eine Weiterentwicklung der regelbasierten Systeme dar. Die Wissensbasis wird in Form von Fehlersuchprogrammen von einem Team von Autoren erstellt, in die verschiedenen Landessprachen der einzelnen Märkte übersetzt und mit Hilfe von CDs/DVDs oder über das Intranet auf die Diagnosesysteme in den Werkstätten kopiert.

Nachdem alle Symptome (DTCs) aus dem Fahrzeug ausgelesen wurden, wird ein Prüfplan erzeugt, der abhängig vom Fahrzeug und den vorhandenen DTCs alle relevanten Fehlersuchprogramme enthält. Der Anwender kann dann die einzelnen Programme starten und abarbeiten. Bei der Abarbeitung der Programme werden dem Mechaniker nacheinander die von den Autoren eingegebenen Prüfanweisungen angezeigt. Abhängig davon, welche Eingaben der Mechaniker macht, verzweigt das Programm in einen anderen Ast und gibt die nächste Anweisung aus. Das Fehlersuchprogramm kann neben der Interaktion mit dem Mechaniker auch mit dem Fahrzeug interagieren. Es kann z.B. Routinen enthalten, die Informationen aus Steuergeräten auslesen oder Veränderungen an dessen Konfiguration vornehmen. Darüber hinaus kann aus einem Fehlersuchprogramm auf die im Tester verbaute Messtechnik zur Erfassung elektrischer Größen zugegriffen werden. Mit Hilfe der GFS ist es möglich, Prüfungen für sehr komplexe Systeme und Fehlerkonstellationen zu erstellen, die dann von allen Mechanikern weltweit ohne weitere Hilfestellungen durchgeführt werden können. Der Prozess zum Erstellen und Verteilen der Fehlersuchprogramme einschließlich der dafür verwendeten Werkzeuge ist u. a. in [Tap04] beschrieben.

Nach dem gleichen Prinzip wie die GFS funktioniert die geführte Funktion, die ebenfalls auf den Kundendiensttestern installiert ist. Mit deren Hilfe können z. B. neue Funkschlüssel angelern oder Softwareanpassungen für einen nachgerüsteten Tempomaten durchgeführt werden. Die hinterlegten Programme werden dabei nicht automatisch durch ein bestimmtes Fehlersymptom, sondern manuell vom Anwender gestartet. Die Programme enthalten genau wie Fehlersuchprogramme eine Abfolge von Anweisungen, die der Mechaniker oder das Diagnosesystem selbst (z.B. einen Datensatz in ein Steuergerät schreiben) durchführen muss.

Die Qualität und Leistungsfähigkeit eines Diagnosesystems, welches auf Expertenwissen basiert, hängt maßgeblich von der Qualität und Vollständigkeit der Wissensbasis ab. Für diese Faktoren sind wiederum die Erfahrungen und die Sorgfalt der Autoren wichtig. Im Folgenden wird ein sinnvoller Weg für die Erstellung von Fehlersuchprogrammen dargestellt.

Zu Beginn wird für das zu diagnostizierende System eine FMEA¹² durchgeführt (vgl. [Lin09]). Als Ergebnis dieser Analyse ist bekannt, welche Fehler in diesem System auftreten können und wie diese sich äußern. Im nächsten Schritt muss sichergestellt werden, dass die On-Board-Diagnose die ermittelten Fehlersymptome in einer ausreichenden Qualität erkennt. Anschließend kann für jeden erkennbaren Fehlerzustand eine quantitative Fehlerbaumanalyse (engl. fault tree analysis, FTA) durchgeführt werden. In [Thu04] wird gezeigt, wie dies sowohl für Hardware als auch für Software eingebetteter Systeme erfolgen kann. Aus dieser Analyse lässt sich ableiten, welches die Ursachen für den Fehlereintritt sein können und wie wahrscheinlich diese jeweils sind. Darauf aufbauend kann ein Entscheidungsbaum erstellt werden. Wenn zusätzlich zu den Eintrittswahrscheinlichkeiten der Fehler der Aufwand für die einzelnen Prüfschritte bekannt ist, lässt sich daraus die günstigste Reihenfolge der Prüfschritte ermitteln. Aufbauend auf dem Entscheidungsbaum wird ein Fehlersuchprogramm erstellt, in dem zu den einzelnen Prüfschritten Anweisungen und

¹²FMEA – engl. Failure Modes and Effects Analysis dt. Fehlermöglichkeiten und Einflussanalyse

Abfragedialoge generiert, sowie Zusatzinformationen wie Abbildungen hinterlegt werden. Bevor das Fehlersuchprogramm an die Werkstätten verteilt wird, werden die Dialoge in die jeweiligen Landessprachen übersetzt.

Ein Nachteil der GFS ist (wie auch bei anderen Systemen, die auf Expertenwissen basieren) der hohe Aufwand für die Erstellung der Fehlersuchprogramme. Eine besondere Schwierigkeit besteht dabei in der Abdeckung aller Varianten eines Fahrzeugs bzw. eines Fahrzeugsystems. Die Varianten entstehen durch die zahlreichen Ausstattungsmöglichkeiten, die sich in einem Fahrzeug kombinieren lassen. Sie müssen bei der Erstellung der Fehlersuchprogramme berücksichtigt werden, da sich Fehler in unterschiedlichen Fahrzeugvarianten unterschiedlich äußern und auch Prüf- und Reparaturanweisungen stark variieren können. Aus diesem Grund müssen zahlreiche Abfragen und Verzweigungen für die unterschiedlichen Varianten in die Fehlersuchprogramme eingebaut werden, wodurch sich sowohl der Erst- und Pflegeaufwand als auch der Aufwand für die Validation der Fehlersuchprogramme erhöht.

Modellbasierte Diagnose

Die modellbasierte Diagnose verwendet ein Modell des zu diagnostizierenden Systems, um Fehler zu erkennen und auf mögliche Ursachen schließen zu können. Modellbasierte Diagnoseverfahren können sowohl in der On-Board-Diagnose als auch in einem Off-Board-Diagnosesystem umgesetzt sein.

Modellbasierte Diagnoseverfahren in Steuergeräten kommen vor allem bei Systemen zum Einsatz, die sich einfach durch mathematische Modelle beschreiben lassen. Vor allem im Zusammenhang mit einer modellbasierten Steuerung und Regelung z. B. von Verbrennungsmotoren [Ise03] ist dies möglich, da dort sowohl die Regler als auch die Regelstrecken mathematisch beschrieben sind. Das Diagnoseverfahren versucht dabei permanent das Verhalten des zu diagnostizierenden Systems gegen das Modell (Idealverhalten) zu plausibilisieren. Bei einer signifikanten Abweichung des Istverhaltens vom Sollverhalten wird von einem Fehler ausgegangen. Um eine Eingrenzung der Fehlerursache zu ermöglichen, kann jedes Element des Modells um mögliche Fehlverhalten erweitert werden. Dadurch kann der Diagnosealgorithmus im Fehlerfall das Modell verändern, so dass sich wieder das Verhalten des zu diagnostizierenden Systems einstellt. Anhand der vorgenommenen Veränderung am Modell kann auf die Fehlerursache geschlossen werden (vgl. [Hei99]). Die Abbildung 2.2 stellt den Aufbau eines solchen Diagnosesystems exemplarisch dar.

Eine weitere Möglichkeit der modellbasierten Diagnose stellt die Verwendung von Signalmodellen dar [Ise06]. Bei diesem Verfahren wird der Signalverlauf der Prozessmessgrößen bezüglich eines Normal- oder Fehlverhaltens analysiert. Dies kann z.B. mit Hilfe von Bandpassfiltern oder einer Analyse des Frequenzspektrums erfolgen. Dadurch lassen sich z.B. Vibrationen oder Zündaussetzer bei Verbrennungsmotoren erkennen.

Modellbasierte Diagnoseverfahren benötigen, abhängig von der Komplexität des Modells, verhältnismäßig viel Rechenkapazität und Speicher. Deshalb können sie nur für Systeme eingesetzt werden, die sich durch einfache Modelle beschreiben lassen. In [SH04] und [BCC⁺01] sind modellbasierte Systeme für eine Off-Board-Diagnose, z.B. für Werkstattssysteme, beschrieben. In [Tap04] sind die modellbasierten Diagnosesysteme Raz' r und RODON ausführlich beschrieben. Im interdisziplinären Projekt STEP-X, das die Volkswagen AG in den Jahren 2001 bis 2006 gemeinsam mit mehreren Instituten der TU-Braunschweig durchgeführt hat, wurde der modellbasierte Ansatz mit den oben genannten Tools ausführlich untersucht und bewertet. (vgl. [Har07], [Ehl03], [Hor05], [Mut05]) Obwohl die zugrundeliegenden Konzepte bereits seit den 1990er Jahren bekannt sind, haben sie im Automobilbereich bis heute keine signifikante Verbreitung gefunden. Dies liegt nicht nur am hohen Rechenaufwand zur Berechnung kompletter Fahrzeugmodelle. Die vollständige Modellierung eines Fahrzeuges zu Diagnosezwecken wäre darüber hinaus mit einem sehr hohen Aufwand und Kosten verbunden.

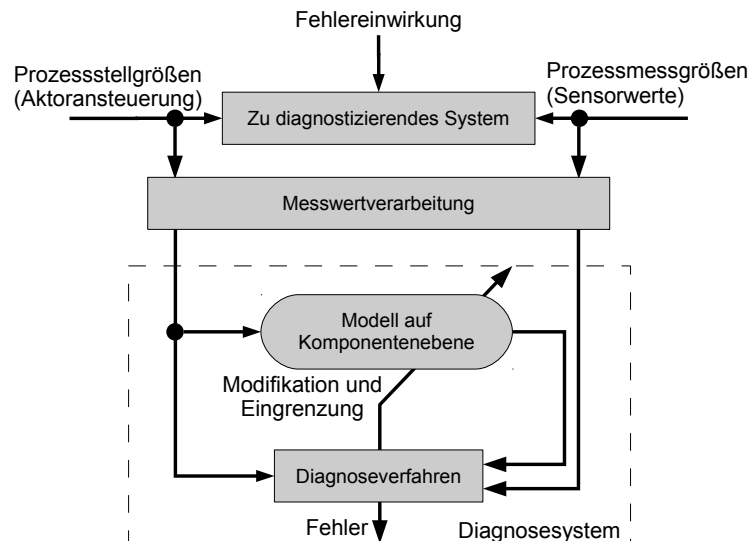


Abbildung 2.2.: Struktur einer modellbasierten Diagnose [Hei99]

Bei sehr komplexen Systemen sind die Modelle ebenfalls sehr komplex und damit auch fehleranfällig. Da die Diagnose das Verhalten des Modells mit dem des realen Systems vergleicht, können Fehler oder Ungenauigkeiten im Modell weitreichende Auswirkungen haben. Es ist z.B. möglich, dass eine Diagnosefunktion einen Fehler erkennt, wenn ein Fehler im Modell, jedoch nicht im realen System vorliegt. Es ist auch möglich, dass das Modell die gleichen Schwachstellen wie das reale System aufweist und die Diagnose den Fehler dadurch nicht erkennt. Bei komplexen Modellen steigt dadurch die Wahrscheinlichkeit einer Fehldiagnose. Eines der Ergebnisse aus dem Projekt STEP-X ist, dass ein modellbasiertes Diagnosesystem ab einer bestimmten Komplexität unwirtschaftlich wird (bedingt durch den notwendigen hohen Erst- und Verifikationsaufwand).

Erfahrungsbasierte Diagnose

Erfahrungsbasierte Diagnosesysteme sind in der Lage, aus bekannten Fehlersituationen zu lernen und so eine Hilfestellung für zukünftige Fehlersituationen zu geben. Dies ist vor allem dann interessant, wenn viele Werkstätten eine gemeinsame Wissensbasis verwenden, da dann die Wahrscheinlichkeit hoch ist, dass der gleiche Fehler bereits in einer anderen Werkstatt erfolgreich behoben wurde (vgl. [MBK07]). In [MLB⁺07] und [MKL⁺08] wird ein System zur erfahrungsbasierten Diagnose beschrieben, das mittels künstlicher neuronaler Netze automatisch aus Reparaturdaten lernen kann. Das System setzt voraus, dass in den Werkstätten sowohl die Fehlersymptome (Kundenbeanstandungen und DTCs) als auch die durchgeführten Reparaturmaßnahmen erfasst und an ein zentrales Datawarehouse übermittelt werden. Dies ist z.B. bei Werkstätten des Volkswagen Kundendienstes der Fall. Mit Hilfe der genannten Daten aus dem Feld werden regelmäßig neuronale Netze trainiert, welche dadurch den Zusammenhang zwischen Fehlersymptomen und vermutlich erfolgreichen Reparaturmaßnahmen lernen. Das Diagnosesystem kann den Mechaniker während der Fehlersuche unterstützen, in dem es ihm Reparaturhandlungen vorschlägt, die in anderen Werkstätten bei einem ähnlichen Problem erfolgreich waren. Neuronale Netze können Probleme in gewissen Grenzen generalisieren. Dadurch können sie Ähnlichkeiten zu anderen Reparaturfällen erkennen. Dies ist wichtig, da Fehler möglicherweise unterschiedlich wahrgenommen und in das System eingegeben werden. Auch Überdeckungen mit anderen Fehlern können von den neuronalen Netzen erkannt werden.

Das Prinzip der erfahrungsbasierten Diagnose unterscheidet sich signifikant von den modellbasierten Diagnoseverfahren. Erfahrungsbasierte Diagnose ist eine „Black-Box-Diagnose“. Das bedeutet, dass dem Diagnosesystem keinerlei Informationen über den inneren Aufbau und

die Funktion des zu diagnostizierenden Systems vorliegen. Es werden lediglich Informationen über Fehlersymptome und Abstellmaßnahmen verarbeitet. Erfahrungsbasierte Diagnosesysteme benötigen immer Erfahrungen aus erfolgreichen Reparaturfällen, um unterstützen zu können. Modellbasierte Diagnose wird als „White-Box-Diagnose“ bezeichnet. Die Diagnosesysteme müssen den genauen Aufbau (Struktur) des Systems und dessen Funktionalität (Verhalten) kennen. Mit Hilfe dieser Informationen können sie dann selbständig mögliche Fehlerkandidaten ermitteln.

2.2 Bayes-Netze

Bayes-Netze (engl. bayesian networks) stellen ein Verfahren zum wahrscheinlichkeitsbasierten Schließen dar. Sie können in wissensbasierten Diagnosesystemen eingesetzt werden, um Schlussfolgerungen auf Grund von unsicherem Wissen zu treffen. Der Ursprung der Bayes-Netze liegt in den 1980er Jahren im Umfeld der Erforschung künstlicher Intelligenz. Man sah sich bei der Entwicklung von Expertensystemen vielfach dem Problem ausgesetzt, Unsicherheit und Vagheit in wissensbasierten Systemen verarbeiten zu müssen. Judea Pearl hat mit dem Buch „Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems“ [Pea88] einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung dieser Technologie gehabt.

Bayes-Netze sind graphische Modelle zur Berechnung von Zustandswahrscheinlichkeiten einzelner Variablen auf Basis der Graphentheorie. Sie eignen sich zur Modellierung komplexer Zusammenhänge in Form von Abhängigkeitsstrukturen. Bei der Berechnung wird das komplexe Modell in Teile zerlegt, so dass bei jeder Berechnung nur die Elemente berücksichtigt werden, die voneinander abhängen. Auf Grund dieser Eigenschaft werden Bayes-Netze auch als zerlegbare graphische Modelle (engl. decomposable graphic model in [CDLS03]) bezeichnet.

Unsicheres Wissen wird in Bayes-Netzen mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie abgebildet. Aus diesem Grund werden sie in der Literatur auch mit „Probabilistic Networks“ bezeichnet (vgl. [KM05]).

2.2.1 Wahrscheinlichkeitstheorie

Die Funktion der Bayes-Netze wird maßgeblich durch die Formel von Bayes (Formel (2.8) auf Seite 19) bestimmt. Im Folgenden werden einige Elemente aus der Wahrscheinlichkeitstheorie beschrieben, die für das Verständnis der Bayes-Netze notwendig sind. Die Wahrscheinlichkeitstheorie ist ein Teilgebiet der Stochastik und beschäftigt sich mit der mathematischen Beschreibung zufälliger Phänomene. Mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie ist es möglich, Aussagen über Ereignisse zu treffen, über die keine absolute Gewissheit besteht. Für eine umfassende Beschreibung der mathematischen Zusammenhänge sei an dieser Stelle auf Literatur wie [HSA99] oder [Pap08] verwiesen.

Ereignisraum

Der Ereignisraum Ω stellt die Menge möglicher Ereignisse dar, die in einer bestimmten Situation eintreten können. Diese Ereignisse werden auch als zufällige Ereignisse bezeichnet, da nicht vorhersagbar ist, welches der möglichen Ereignisse tatsächlich eintritt. Die geworfene Augenzahl beim Würfeln ist z.B. ein Element aus dem endlichen Ereignisraum $\Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$. Jede Aussage bezüglich eines zufälligen Ereignisses bezieht sich auf eine Teilmenge $A \subseteq \Omega$ des Ereignisraums. Beispiele sind: $A = \{6\}$ oder $A = \{1, 3, 5\}$. Jedes der möglichen Ereignisse nimmt einen von zwei Zuständen: *[eingetroffen, nicht eingetroffen]*, oder allgemeiner $[1, 0]$ ein.

Wahrscheinlichkeitsfunktion

Die Wahrscheinlichkeitsfunktion ist eine reellwertige Funktion $P(A)$, mit der sich die Wahrscheinlichkeit bestimmen lässt, dass ein bestimmtes (zufälliges) Ereignis aus dem Ereignisraum Ω eintritt. Sie errechnet sich (im einfachsten Fall einer Gleichverteilung) aus der Anzahl entsprechender Ereignisse N_A im Verhältnis zur Gesamtzahl aller Ereignisse N .

$$P(A) = \frac{N_A}{N} \quad (2.1)$$

Bedingte Wahrscheinlichkeit

Bedingte Wahrscheinlichkeit ist vor allem für die Wissensrepräsentation wichtig. Die Grundlage für eine bedingte Wahrscheinlichkeit ist die Beobachtung, dass das Eintreten eines Ereignisses

B die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Ereignisses A beeinflusst. Die bedingte Wahrscheinlichkeit des Ereignisses A unter der Bedingung, dass das Ereignis B eingetreten ist, wird mit $P(A|B)$ bezeichnet.

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad \text{mit } P(B) > 0 \quad (2.2)$$

Verbundwahrscheinlichkeit und Kettenregel

Der Ausdruck $P(A \cap B)$ in der Gleichung 2.2 bezeichnet die Verbundwahrscheinlichkeit. Diese gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass zwei Ereignisse A und B gemeinsam auftreten. Soll die Wahrscheinlichkeit für das gemeinsame Auftreten von n Ereignissen bestimmt werden, erfolgt dies mit Hilfe der Kettenregel¹³. Die Gleichung 2.3 gibt diese für n Elemente an.

$$P\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right) = P(A_1) \cdot P(A_2|A_1) \cdot P(A_3|A_1 \cap A_2) \cdot \dots \cdot P(A_n|A_1 \cap \dots \cap A_{n-1}) \quad (2.3)$$

Stochastische Unabhängigkeit

Zwei Ereignisse werden als stochastisch unabhängig bezeichnet, wenn das Auftreten des einen Ereignisses keinen Einfluss auf das Auftreten des anderen Ereignisses hat.

$$P(A|B) = P(A) \quad \text{bzw.} \quad P(B|A) = P(B) \quad (2.4)$$

Eine Menge E von n Ereignissen heißt *paarweise stochastisch unabhängig*, wenn für jedes Paar $A, B \in E$ die Gleichung 2.5, welche sich aus den Gleichungen 2.2 und 2.4 bilden lässt, gilt.

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) \quad (2.5)$$

Als *vollständig stochastisch unabhängig* werden die Elemente $\{A_1, \dots, A_k\} \in E$ bezeichnet, wenn Gleichung 2.6 gilt.

$$P(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_k) = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot \dots \cdot P(A_k) \quad (2.6)$$

Absolute Wahrscheinlichkeit

Die absolute Wahrscheinlichkeit $P(A)$ für ein beliebiges Ereignis A kann ermittelt werden, wenn nur bedingte und bedingende Wahrscheinlichkeiten des jeweiligen Ereignisses bekannt sind. Voraussetzung dafür ist, dass die Ereignisse B_i ($1 \leq i \leq n$) eine vollständige Ereignisdisjunktion bilden. Dies ist erfüllt, wenn $B_1 \cup \dots \cup B_n = \Omega$ und $B_i \cap B_k = \emptyset \quad \forall i \neq k$ gilt.

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A \cap B_i) = \sum_{i=1}^n P(A|B_i) \cdot P(B_i) \quad (2.7)$$

Formel von Bayes

Mit Hilfe der Formeln (2.2) bis (2.7) lässt sich die Formel von Bayes herleiten. Damit kann die bedingte Wahrscheinlichkeit $P(B_j|A)$ beliebiger Ereignisse B_j unter der Bedingung A berechnet werden, wenn lediglich die absolute Wahrscheinlichkeit $P(B_j)$ sowie die bedingten Wahrscheinlichkeiten $P(A|B_j)$ bekannt sind. Für eine vollständige Ereignisdisjunktion B_1, \dots, B_m und einem beliebigen Ereignis A gilt dann:

$$P(B_j|A) = \frac{P(A \cap B_j)}{P(A)} = \frac{P(A|B_j) \cdot P(B_j)}{P(A)} = \frac{P(A|B_j) \cdot P(B_j)}{\sum_{i=1}^n P(A|B_i) \cdot P(B_i)}. \quad (2.8)$$

¹³Die Kettenregel wird auch als Verkettungsregel oder allgemeine Multiplikationsregel bezeichnet.

Die Wahrscheinlichkeiten $P(B_j)$ werden in diesem Zusammenhang mit a priori¹⁴ bezeichnet. Die Wahrscheinlichkeiten $P(B_j|A)$ werden mit a posteriori¹⁵ bezeichnet. Die Wahrscheinlichkeit $P(B_j)$ ist die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten von B_j vor Kenntnis des Ereignisses A und die Wahrscheinlichkeit $P(B_j|A)$ das Eintreten dieses Ereignisses nach Kenntnis von A . Im Kontext wissensbasierter Systeme wird das Berechnen der A-posteriori-Wahrscheinlichkeit auch zum Berechnen des aktuellen Vertrauens in eine Aussage verwendet.

Bedeutung der Formel von Bayes in der Diagnose

Die Formel von Bayes kann im Kontext der wahrscheinlichkeitsbasierten Diagnose zur Ermittlung wahrscheinlicher Fehlerursachen bei gegebenen Fehlersymptomen ($P(Ursache|Symptom)$) verwendet werden. Die Gleichung 2.9 zeigt die Berechnung, wenn nur ein Symptom berücksichtigt wird. Gemäß der Formel 2.8 lässt sich dies auf beliebig viele Symptome erweitern.

$$P(Ursache|Symptom) = \frac{P(Symptom|Ursache) \cdot P(Ursache)}{P(Symptom)} \quad (2.9)$$

Die bedingten Wahrscheinlichkeiten $P(Symptom|Ursache)$ können dafür in Form von Wahrscheinlichkeitstafeln (Matrizen) abgespeichert und verarbeitet werden. Jedoch ist dieses Vorgehen nur bei sehr wenigen Symptomen und Ursachen sinnvoll, da sowohl die Anzahl der Berechnungsschritte als auch die Größe der Wahrscheinlichkeitstafeln exponentiell steigt. Bayes-Netze bieten eine Methode, um auch sehr umfangreiche Systeme dieser Art berechnen zu können.

2.2.2 Graphentheorie

Die Graphentheorie beschäftigt sich mit Strukturen zur Modellierung von Zusammenhängen. Neben den im Folgenden beschriebenen und im Kapitel 4 verwendeten Bayes-Netzen existieren zahlreiche weitere Anwendungsfälle dafür. Im Kapitel 5 dieser Arbeit werden Methoden der Graphentheorie zur Analyse elektrischer Strukturen eingesetzt. In Bayes-Netzen werden Graphen verwendet, um Abhängigkeitsbeziehungen zwischen Variablen darzustellen und zu verarbeiten. In diesem Abschnitt werden lediglich die Konzepte der Graphentheorie eingeführt, die zum Verständnis der Kapitel 4 und 5 notwendig sind. In [Die06] wird die Thematik ausführlich behandelt.

Ein Graph $G = V, E$ ist definiert als ein Tupel aus einer Menge V von Knoten (engl. vertices, nodes) und einer Menge E von Kanten (engl. edges). Wenn zwei Knoten V_1 und V_2 durch eine Kante miteinander verbunden sind, werden sie als Nachbarn bezeichnet. Sind die zwei Knoten durch eine gerichtete Kante, in Form $V_1 \rightarrow V_2$, verbunden, wird V_2 als Kindknoten oder Kind von V_1 und V_1 als Elternknoten von V_2 bezeichnet.

Ein Pfad ist eine Menge von n Knoten, die in Form von $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow \dots \rightarrow V_n$ durch gerichtete Kanten verbunden sind. Wenn in diesem Fall $V_n = V_1$ ist, wird dies als Zyklus bezeichnet.

Ein gerichteter azyklischer Graph (Directed Acyclic Graph, DAG) ist ein gerichteter Graph, der frei von Zyklen ist. Eine besondere Form eines solchen Graphen ist der Baum. Dabei handelt es sich um einen DAG, bei dem alle Pfade von einem gemeinsamen Knoten, der Wurzel, ausgehen. Die Endknoten der Pfade werden bei einem Baum als Blätter bezeichnet.

Ein Graph heißt vollständig verbunden oder voll vernetzt, wenn alle Knoten direkt miteinander verbunden sind. Eine vollständige Vernetzung kann auch für eine Teilmenge ($H \subset G$) von mindestens drei Knoten des Graphen bestehen. Der Begriff Clique bezeichnet eine maximale vollständig verbundene Teilmenge des Graphen G . H ist eine Clique, wenn keine weitere vollständig verbundene Teilmenge ($H' \subset G$) des Graphen existiert, die größer ist als H und H vollständig enthält ($H \subset H'$) [HSA99].

¹⁴lat. vom Früheren her [DUD05] wird auch als Anfangswahrscheinlichkeit oder Vorwissen bezeichnet

¹⁵lat. vom Späteren her d. h. , man erkennt die Ursache aus der zuerst erfahrenen späteren Wirkung [DUD05]

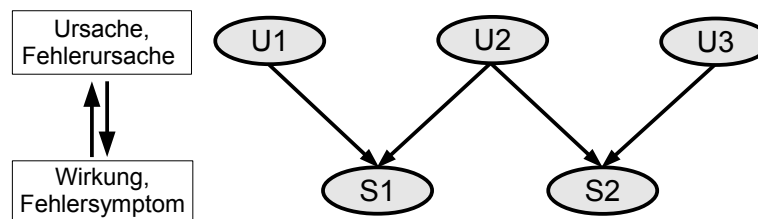


Abbildung 2.3.: Einfaches Bayes-Netz zur Modellierung von Abhängigkeiten

2.2.3 Semantik von Bayes-Netzen

Ein Bayes-Netz ist ein gerichteter azyklischer Graph (DAG). Die Menge der Knoten stellt Zufallsvariablen dar, die eine endliche Anzahl an Zuständen haben, wobei jedem Zustand eine Wahrscheinlichkeit zugewiesen ist. Die Menge der Kanten beschreibt die kausalen Abhängigkeiten zwischen den Zufallsvariablen. Eine gerichtete Kante zwischen zwei Knoten bedeutet, dass eine direkte Abhängigkeit zwischen diesen Variablen besteht. Das Schließen innerhalb eines Netzes erfolgt sowohl in Pfeilrichtung als auch in entgegengesetzter Richtung. Eine Kante zwischen zwei Knoten kann in zweierlei Weise interpretiert werden. Zum einen kann sie eine Ursache-Wirkungs-Richtung anzeigen. In dem Fall zeigt der Pfeil von der Ursache zur Wirkung. Der Zustand des Ursachenknotens beeinflusst in diesem Fall den Zustand des Wirkungsknotens.

Betrachtet man die Kante entgegen der Pfeilrichtung, so ist es möglich, auf Grund bekannter Wirkungen die in Frage kommenden Ursachen zu bestimmen. Dies ist eine Funktionalität, die für den Einsatz in der Diagnose wesentlich ist. In Abbildung 2.3 ist ein einfaches Bayes-Netz dargestellt, in dem entgegen der Pfeilrichtung von vorhandenen Fehlersymptomen ($S1$, $S2$) auf eine oder mehrere mögliche Ursachen aus der Menge $\{U1, U2, U3\}$ geschlossen werden kann.

Das Wissen über den konkreten Zustand einer Variablen wird als Evidenz bezeichnet. Wenn an einem bestimmten Knoten im Netz eine Evidenz gesetzt wird, hat dies einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung anderer Knoten. Es werden zwei Arten von Evidenz unterschieden. Die harte oder spezifische Evidenz beschreibt eine Gewissheit bzgl. eines Sachverhaltes, z. B. das Ergebnis einer Beobachtung und führt dazu, dass die Wahrscheinlichkeit eines der Zustände auf 1.0 (100%) gesetzt wird. Wenn dies der Fall ist, wird auch von einer Instantiierung des Knotens gesprochen. Die zweite Art der Evidenz ist die weiche oder auch virtuelle Evidenz. Sie drückt keine Gewissheit, sondern eine messbare Unsicherheit mit einer Wahrscheinlichkeit zwischen 0,0 und 1.0 aus.

Abhängigkeitsstrukturen

Die Struktur des Netzes, die durch die gerichteten Kanten zwischen den einzelnen Knoten bestimmt wird, legt fest, wie sich das Netz verhält. Sind zwei Knoten durch eine Kante verbunden, drückt dies eine Abhängigkeit zwischen den Variablen aus. Andernfalls sind die Variablen unabhängig voneinander. Die Richtung der Kanten wird i. d. R. so gewählt, dass die Pfeile von der Ursache zur Wirkung zeigen (vgl. Abbildung 2.3). Wenn zwei Knoten X und Z durch einen dritten Y verbunden sind, können verschiedene Abhängigkeitsstrukturen gebildet werden. Die Abbildung 2.4 stellt die Grundformen möglicher Strukturen dar.

Bei kaskadierenden gerichteten Kanten (Abbildung 2.4 a) hat Knoten X Einfluss auf Knoten Y und der hat wiederum Einfluss auf Knoten Z . Ebenso hat eine Evidenz auf Knoten Z Einfluss auf Knoten Y und darüber auch auf Knoten X . Wenn Y instantiiert ist, also eine harte Evidenz gesetzt hat, ist der Informationsfluss unterbrochen.

In konvergierenden Verbindungen haben mehrere Elternknoten Einfluss auf einen gemeinsamen Kindknoten. Wenn der Kindknoten (Y in Abbildung 2.4 b) nicht instantiiert ist, hat ein Elternknoten (X) keinen Einfluss auf den anderen Elternknoten (Z). Dies ändert sich, sobald der Zustand des

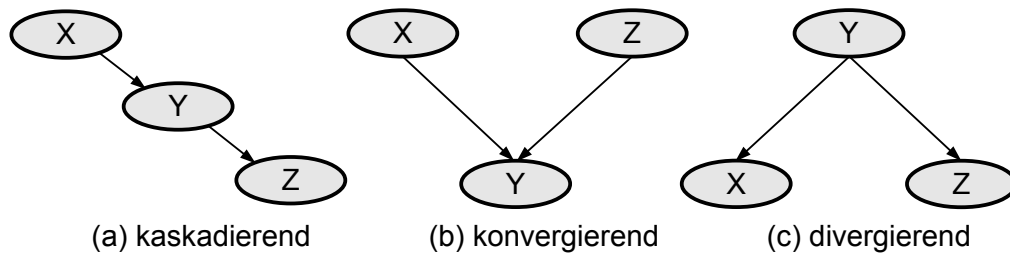


Abbildung 2.4.: Grundformen von Bayes-Netzen [HSA99]

Kindknoten bekannt ist. Dadurch spricht man von einer bedingten Abhängigkeit zwischen den Elternknoten.

Bei divergierenden Verbindungen (Abbildung 2.4 c) beeinflusst ein Elternknoten alle Kindknoten. Eine Instantiierung eines Kindknoten hat Einfluss auf den Elternknoten und dadurch auch auf die anderen Kindknoten, solange der Elternknoten nicht selbst instantiiert ist. In diesem Zusammenhang wird von einer bedingten Unabhängigkeit gesprochen, die eintritt, sobald der Elternknoten instantiiert wird.

2.2.4 Berechnen der Wahrscheinlichkeiten

Jeder Knoten besitzt eine Tabelle mit bedingten Wahrscheinlichkeiten für jeden möglichen Zustand. Diese Tabelle wird auch als Wahrscheinlichkeitstafel oder CPT¹⁶ bezeichnet. Bei Knoten, die keine Eltern haben, enthält die CPT lediglich eine Spalte mit A-priori-Wahrscheinlichkeiten für jeden möglichen Zustand.

Die Berechnung des Netzes wird durch ein externes Ereignis angestoßen und hat zum Ziel, die Wahrscheinlichkeiten für alle relevanten Knoten neu (lat. a posteriori) zu berechnen. Ein externes Ereignis ist, wenn dem Netz bekanntgegeben wird, dass sich der Zustand bzw. die Wahrscheinlichkeitsverteilung eines Knotens geändert hat.

Das Ereignis wird innerhalb des Netzes entlang der Kanten propagiert. Das bedeutet, dass der Knoten, bei dem eine Veränderung stattgefunden hat, alle benachbarten (durch eine Kante direkt miteinander verbunden) Knoten benachrichtigt. Jeder Knoten, der benachrichtigt wird, führt weitere Operationen z.B. eine Änderung interner Variablen durch und benachrichtigt wiederum seine Nachbarn (Ausnahme: der Knoten, der ihn zuvor benachrichtigt hat).

Jeder Knoten funktioniert wie ein eigener Prozessor, der über Nachrichten kommunizieren und interne Variablen berechnen kann. Sobald er eine Nachricht von einem anderen Knoten erhält, führt er Berechnungen durch und übermittelt die Ergebnisse (falls sich ein Wert geändert hat) an die übrigen Nachbarknoten. An dieser Stelle ist zu erkennen, weshalb ein Bayes-Netz keine Zyklen enthalten darf. Wäre dies der Fall, würde die Berechnung des Netzes nicht in endlicher Zeit möglich sein.

Die Struktur des Netzes (Abhängigkeitsstruktur) legt fest, welche Knoten benachrichtigt und welche Berechnungen durchgeführt werden müssen, sobald sich ein Wert ändert. Der notwendige Rechenaufwand hängt dadurch maßgeblich von der Struktur des Netzes und nicht nur von der Anzahl der Knoten ab.

In Abbildung 2.5 ist ein Netz mit vier Knoten A, B, C, D und allen Kommunikationsbeziehungen von Knoten B mit seinen Nachbarknoten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass, obwohl das Netz gerichtete Kanten enthält, der Informationsfluss jeweils in beide Richtungen erfolgt. Im Folgenden werden die Daten, die innerhalb jedes Knotens (in diesem Fall Knoten B) vorhanden sind, erläutert. Die Berechnungsvorschriften sind aus [HSA99] übernommen.

¹⁶CPT – conditional probability table dt. Tabelle bedingter Wahrscheinlichkeiten

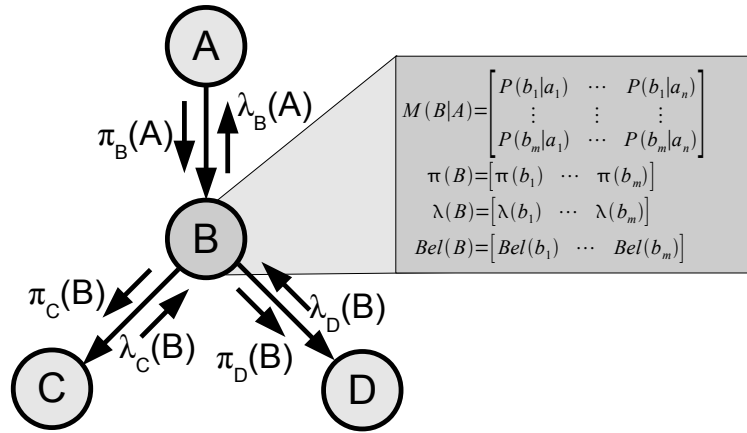


Abbildung 2.5.: Informationsfluss in Bayes-Netzen, interne Größen eines Knotens

- $M(B|A)$ ist die Matrix mit bedingten Wahrscheinlichkeiten (CPT). Die Elemente $P(b_j|a_i)$ beschreiben die Beziehung zwischen dem Knoten B und dem Elternknoten A . Die Matrix quantifiziert die Stärke der gerichteten Kante $A \rightarrow B$ und bleibt während aller Berechnungen konstant.
- $\pi(B) = [\pi(b_1), \pi(b_2), \dots, \pi(b_m)]$ Vektor, der die Stärke des Einflusses für jeden Zustand von allen Vorgängerknoten (in diesem Fall nur Knoten A) von B enthält. $\pi(B)$ wird bei jedem Propagieren neu berechnet.
- $\lambda(B) = [\lambda(b_1), \lambda(b_2), \dots, \lambda(b_m)]$ Vektor, der die Stärke des Einflusses für jeden Zustand von allen Nachfolgeknoten von B enthält. $\lambda(B)$ wird bei jedem Propagieren neu berechnet.
- $Bel(B) = [Bel(b_1), Bel(b_2), \dots, Bel(b_m)]$ Vektor, der die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zustände enthält. $Bel(B)$ entspricht dem Vertrauen in den Knoten B . Der Faktor γ ist ein Normierungsfaktor, der so gewählt ist, dass die Summe aller Wahrscheinlichkeiten $Bel(b_1) + \dots + Bel(b_m) = 1$ ergibt.

$$Bel(b_j) = \gamma \cdot \lambda(b_j) \cdot \pi(b_j) \quad \text{mit} \quad \gamma = \frac{1}{\sum_{j=1}^m Bel(b_j)} \quad (2.10)$$

In einem Netz, das wie in Abbildung 2.5 einem einfachen binären Baum entspricht, werden die genannten Daten innerhalb des Knotens folgendermaßen berechnet:

- Der Vektor $\lambda(B)$ wird aus den Nachrichten $\lambda_K(b_j)$ aller Kindknoten K (in diesem Fall Knoten C und D) berechnet.

$$\lambda(b_j) = \prod_{K \in \text{Kinder}(B)} \lambda_K(b_j) \quad (2.11)$$

- Der Vektor $\pi(B)$ berechnet sich aus der Nachricht $\pi_B(A)$ des Knotens A und der Matrix $M(B|A)$.

$$\pi(b_j) = \sum_{i=1}^n P(b_j|a_i) \cdot \pi_B(a_i) \quad \text{bzw.} \quad \pi(B) = M(B|A) \bullet \pi_B(A) \quad (2.12)$$

Nachdem $\lambda(b_j)$ und $\pi(b_j)$ neu berechnet wurden, muss $Bel(B)$ gemäß der Formel (2.10) aktualisiert werden. Im Anschluss daran können die Nachrichten generiert werden, die der Knoten B an seine Nachbarn verschickt.

- Die Nachricht $\lambda_B(A)$, die vom Knoten B an den Elternknoten A geschickt wird, berechnet sich aus dem lokalen Vektor $\pi(B)$ und der Matrix $M(B|A)$.

$$\lambda_B(a_i) = \sum_{j=1}^n \lambda(b_j) \cdot P(b_j|a_i) \quad \text{bzw.} \quad \lambda_B(A) = \lambda(B) \bullet M(B|A) \quad (2.13)$$

- Hätte der Knoten B einen zweiten Elternknoten D , müsste es bei der Berechnung der Nachricht $\lambda_B(A)$ den Wert $\pi_B(D)$ folgendermaßen berücksichtigen.

$$\lambda_B(a_i) = \sum_{j=1}^n \lambda(b_j) \cdot \sum_{k=1}^n P(b_j|a_i, d_k) \cdot \pi_B(d_k) \quad (2.14)$$

- Die Nachricht $\pi_C(B)$, die vom Knoten B an den Kindknoten C geschickt wird, berechnet sich aus dem lokalen Vektor $\pi(B)$ und dem Produkt der Nachrichten $\lambda_K(B)$ aller Kind-Knoten außer C . Man vermeidet dabei das Zurückschicken einer von C empfangenen Nachricht.

$$\pi_C(b_j) = \alpha \cdot \pi(b_j) \cdot \prod_{K \in \text{Kinder}(B), K \neq C} \lambda_K(b_j) \quad (2.15)$$

$\pi_C(b_j)$ kann auch berechnet werden, indem aus $Bel(b_j)$ (das bereits alle λ_K -Nachrichten enthält) der Inhalt der Nachricht $\lambda_C(B)$ herausgerechnet wird. Der Normierungsfaktor α ist genau wie in Formel (2.10) so zu wählen, dass die Summe der Wahrscheinlichkeiten 1 ergibt.

$$\pi_C(b_j) = \alpha \cdot \frac{Bel(b_j)}{\lambda_C(b_j)} \quad (2.16)$$

Die angegebenen Berechnungen finden in jedem Knoten statt, sobald sich eine der eingehenden Nachrichten ändert. In Konsequenz daraus werden die ausgehenden Nachrichten berechnet und an alle Knoten, außer an den, von dem die eingehende Nachricht kam, weitergegeben. Diese gehen dann nach dem gleichen Prinzip vor. Theoretisch ist es dadurch möglich, dass bei einer Neuberechnung des Netzes jeder Knoten einmal alle Berechnungen durchführen muss. Abhängig von der Struktur des Netzes muss jedoch i. d. R. nur ein geringer Teil von Knoten neu berechnet werden. Dadurch kann auch die Berechnung sehr umfangreicher Bayes-Netze sehr effizient erfolgen, wenn eine entsprechende Struktur gewählt wird.

2.2.5 Besondere Formen von Bayes-Netzen

Neben den beschriebenen Bayes-Netzen existieren eine Reihe von Erweiterungen für spezielle Anwendungsfälle. Die Knoten eines Netzes können anstelle einer endlichen Anzahl diskreter Zustände eine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsfunktion (z. B. eine Normalfunktion nach Gauß) enthalten. In diesem Fall spricht man von kontinuierlichen Zufallsknoten (engl. Continuous Chance Node) im Gegensatz zu den diskreten Zufallsknoten (engl. Discrete Chance Node), die den bisher verwendeten Knoten entsprechen. Die Verwendung dieser Knoten wird u. a. in [Jen01] beschrieben.

Dynamische Bayes-Netze können zur Nachbildung kontinuierlicher Prozesse, z. B. in der Regelungstechnik, verwendet werden. In [Mur02] und [LPKB00] wird die Technik und auch die Anwendung dynamischer Bayes-Netze beschrieben.

Eine weitere Sonderform sind die objektorientierten Bayes-Netze. In einem solchen Netz kann ein Knoten die Instanz eines anderen Netzes enthalten (Kapselung). Mit dieser Technik können Netze für sehr komplexe Problemstellungen modelliert werden. Die Technik und die Anwendungsgebiete für objektorientierte Bayes-Netze werden in [Jen01] und [WMI05] beschrieben.

In [GMS04], [Nea03] und [Wit02] sind Verfahren zum Trainieren von selbst lernenden Bayes-Netzen beschrieben. Anwendungsbereiche dafür sind z.B. erfahrungsbasierte Diagnosesysteme (vgl. Abschnitt 2.1.3). Bei Bayes-Netzen ist es möglich, sowohl die Wahrscheinlichkeitstabellen als auch die Struktur der Netze zu lernen. Abhängig von der Komplexität der Netze (Anzahl der Zufallsvariablen) sind meistens sehr viele Falldaten notwendig, um ein Netz zu trainieren. Lernverfahren für Bayes-Netze werden vor allem in Bereichen mit wenigen Zufallsvariablen eingesetzt und wenn viele Falldaten existieren.

2.2.6 Anwendung in der Diagnose

Da Bayes-Netze auf der Wahrscheinlichkeitstheorie basieren, werden die Diagnoseverfahren, die sie verwenden, als wahrscheinlichkeitsbasierte Diagnoseverfahren bezeichnet. Wahrscheinlichkeitsbasierte Diagnoseverfahren können im Gegensatz zu regelbasierten und den meisten modellbasierten Systemen mit unsicherem Wissen umgehen, sobald sich die Unsicherheit mit Hilfe von Wahrscheinlichkeiten mathematisch erfassen lässt. Die meisten Symptome können z.B. in unterschiedlich starker Ausprägung vorhanden sein. Auch das Ergebnis einer Diagnose ist oft nicht eindeutig, so dass meist nur von mehr oder weniger wahrscheinlichen Ursachen gesprochen werden kann. Sicherheit über die Ursache einer Störung besteht meist erst nach erfolgreicher Reparatur.

Bayes-Netze kommen in unterschiedlichsten Diagnose-Bereichen zum Einsatz. Im Artikel „Decision-Theoretic Troubleshooting“ [HBR95] beschreibt David Heckermann den Einsatz von Bayes-Netzen für die Diagnose von technischen Systemen am Beispiel von Fahrzeugen und Druckern. Ebenfalls mit der Diagnose von Druckern befassen sich [JKK⁺00] und [VV03]. Dynamische Bayes-Netze kommen in [KYM05] zusammen mit statistischen Lernverfahren zur Diagnose von Satelliten zum Einsatz. In [BK05] wird der Einsatz wahrscheinlichkeitsbasierter Verfahren zur Diagnose analoger Schaltungen beschrieben.

In [JMFN09] wird beschrieben, wie Bayes-Netze zur Überwachung einer Sensordatenfusion verwendet werden können. Das beschriebene Verfahren kann für die Entwicklung einer On-Board-Diagnose von Fahrerassistenzsystemen, die auf Daten unterschiedlicher Sensoren angewiesen sind, verwendet werden.

In [Lük03] wird ein Verfahren zur dezentralen Diagnose von dynamischen und mechatronischen Fahrzeugsystemen beschrieben. Dabei kommen manuell erstellte dynamische Bayes-Netze zum Einsatz.

3. | Problemanalyse

In der Automobilindustrie sind in Bezug auf Menge und Komplexität der im Fahrzeug verbauten elektrischen Systeme zwei Trends zu erkennen. Zum einen nimmt die Anzahl der Fahrzeugfunktionen, die durch Elektronik realisiert bzw. unterstützt werden, deutlich zu. Zum Anderen können Fahrzeuge in hohem Maße individualisiert werden. Der Kunde kann dadurch aus einem umfangreichen Repertoire aus Motorisierung, Fahrerassistenz-, Komfort- und Infotainmentsystemen¹ auswählen. Dadurch nimmt die Variantenvielfalt der verbauten elektronischen Systeme in Fahrzeugen des gleichen Typs signifikant zu.

In diesem Kapitel werden Probleme bzw. Defizite aktueller Diagnosesysteme analysiert und Ziele zur Lösung dieser Probleme definiert. Die beschriebenen Probleme wurden aus den Ergebnissen einer Analyse ausgewählt, da sie im Bezug auf die Fragestellung dieser Arbeit relevant sind. Zum Zeitpunkt des Entstehens dieser Arbeit ist kein Diagnosesystem bekannt, das eine befriedigende Lösung für alle beschriebenen Probleme bietet.

3.1 Mögliche Fehlerursachen

Problem: Variantenvielfalt

Um individuelle Bedürfnisse der Kunden befriedigen zu können, besitzen moderne Fahrzeuge eine große Zahl optionaler elektronischer Systeme und Funktionen. Für aktuelle Fahrzeuge können z. B. theoretisch mehrere Milliarden elektrisch verschiedene Varianten für unterschiedliche Ausstattungskombinationen gebaut werden. Erschwerend kommt hinzu, dass die Fahrzeuge kontinuierlich weiterentwickelt werden. Regelmäßig stattfindende Modellpflegen haben das Ziel, Qualität und Kosten der Systeme zu verbessern sowie dem Kunden neue Funktionalitäten zur Verfügung zu stellen. Dadurch können sich scheinbar gleiche Fahrzeuge u. a. in folgenden Punkten unterscheiden:

- Verschiedene Hard- und Softwareversionen der Teilsysteme
- Andere Leitungsstränge
- Andere Sicherungsboxen und Sicherungsbelegungen
- Zusätzliche Komponenten (Steuergeräte, Sensoren, Aktoren)
- Entfall von Komponenten
- Komponenten, die in der Vergangenheit häufiger defekt waren, wurden durch hochwertigere bzw. robustere ersetzt
- bisher zuverlässige Komponenten können fehleranfälliger geworden sein (z. B. anderer Zulieferer oder Herstellungsprozess)

Im Falle einer Störung eines elektrischen Systems ist es für Mechaniker oftmals sehr schwierig abzuschätzen, wo die Ursache für das vorliegende Problem liegen könnte. Auch ihr Erfahrungswissen ist oft nicht hilfreich, da sich ein Fehler in unterschiedlichen Fahrzeugen auf Grund anderer Konfiguration unterschiedlich auswirken kann.

Diagnosesysteme wie die geführte Fehlersuche (GFS vgl. Abschnitt 2.1.3) verwenden von Experten erstellte Fehlersuchprogramme. Dabei überlegt sich der Autor des Fehlersuchprogramms,

¹Systeme zur Fahrerinformation und Unterhaltung z. B. Navigationssysteme, Radios, CD/DVD/MP3-Player

wie bei einer bestimmten Fahrzeugkonfigurationen die Fehlersuche für ein bestimmtes Problem aussehen könnte. Im Anschluss erzeugt er die einzelnen Bildschirmdialoge mit Prüfanweisungen und Anwenderhinweisen und fügt sie zu einem Fehlersuchprogramm zusammen. Auf diese Weise sind in der Vergangenheit über hunderttausend Fehlersuchprogramme entstanden, die jeweils ein Problem in einer Fahrzeugkonfiguration lösen können. Theoretisch müsste für jede Variante ein eigener Satz an Programmen erstellt werden. Auf Grund der Zahl möglicher Varianten ist dies jedoch nicht möglich.

Dies hat in der Praxis zur Folge, dass das Diagnosesystem nicht „weiß“, was tatsächlich in einem konkreten Fahrzeug verbaut ist, da das Fehlersuchprogramm nicht für die konkrete Variante geschrieben wurde. Damit das Diagnosesystem keine Falschaussagen macht, werden die Prüfanweisungen heute i. d. R. sehr allgemeingültig formuliert.

Problem: keine Berücksichtigung von Felddaten

Für die Fehlersuche sind Erfahrungen aus vergangenen Reparaturfällen besonders hilfreich. Sie ermöglichen es einem erfahrenen Mechaniker, zuerst die Komponenten zu überprüfen, die häufiger ausfallen. Prüfungen, die mit hohem Aufwand oder Risiko verbunden sind, werden vom Mechaniker oft erst durchgeführt, wenn er alles andere ausgeschlossen hat. Auch Diagnosesysteme sollten sich dieses Wissen zu Nutze machen.

Es existieren in den meisten Fällen Statistiken über die Ausfallhäufigkeit einzelner Komponenten. Die Erhebung dieser Daten ist oftmals aus Gründen der Qualitätssicherung nötig. In die Statistiken gehen dann Daten tausender Reparaturfälle ein. Das Wissen über die Ausfallhäufigkeit bestimmter Komponenten kann zur Verbesserung der Fehlersuchstrategie beitragen. Dadurch, dass Prüfungen von Komponenten mit hoher Ausfallhäufigkeit im Vergleich zu anderen vorgezogen werden, kann die durchschnittliche Anzahl der notwendigen Prüfungen zur Identifikation der Fehlerursache reduziert werden. In die Fehlersuchprogramme der GFS gehen diese Daten jedoch typischerweise nicht ein, da zum Zeitpunkt der Erhebung der Daten die Erstellung der Programme normalerweise abgeschlossen ist. Nur in besonderen Fällen werden Programme auf Grund von Häufungen bestimmter Fehler im Nachhinein angepasst. Viele kleine Probleme, z.B. dass die Reihenfolge der Prüfschritte im Fehlersuchprogramm im Durchschnitt einen höheren Aufwand verursacht als nötig, werden in vielen Fällen nicht analysiert und korrigiert.

Wenn ein Diagnosesystem die Statistiken aus den Felddaten unmittelbar verwerten könnte, um Fehlerkandidaten zu ermitteln und die Reihenfolge der Prüfungen anzupassen, hätte dies ein enormes Potenzial, Kosten bei der Fehlersuche zu sparen.

Problem: Interpretation der Fehlersymptome

Fehler bzw. Störungen in der Fahrzeugelektronik können sich unterschiedlich äußern. Meist sind es Störungen oder Ausfälle bestimmter Funktionen, die den Fahrer eines Fahrzeugs veranlassen, den Wagen in die Werkstatt zu bringen. Die Aussage des Kunden zum vorliegenden Problem wird als Kundenwahrnehmung bezeichnet und sollte bei der Fehlersuche berücksichtigt werden. Ein Großteil der Störungen, die in den elektronischen Systemen auftreten können, werden von der On-Board-Diagnose des Fahrzeugs erkannt.

Damit ein Fahrzeug repariert werden kann, muss zunächst die Fehlerursache ermittelt werden. Dies geschieht, indem von den Fehlersymptomen auf die wahrscheinliche Ursache geschlossen wird. Es gibt verschiedene Arten von Fehlersymptomen, welche unterschiedlich behandelt werden sollten:

- Ereignisspeichereinträge
- Kundenwahrnehmungen
- Funktion gegeben / nicht gegeben
- Messergebnisse (z. B. Spannung, Widerstand oder Strom)

- Stellgliedtest erfolgreich / nicht erfolgreich (vgl. Abschnitt 2.1.1)
- Inhalt von Messwertblöcken (vgl. Abschnitt 2.1.1)
- Wahrnehmungen (Geräusche, Gerüche)

Wenn ein Mensch auf Grund der Fehlersymptome mögliche Fehlerkandidaten ermitteln soll, versucht er zunächst, sich aus der Summe der Fehlersymptome ein Bild zu schaffen. Wenn er über einen ausreichenden Erfahrungsschatz verfügt, werden ihm wahrscheinlich zu jedem einzelnen Symptom verschiedene mögliche Fehlerursachen einfallen. Die einzelnen Symptome wird er intuitiv gewichten, so dass sie einen unterschiedlich starken Einfluss auf sein Erwartungsbild haben. Als Ergebnis wird wahrscheinlich eine kleine Menge an möglichen Fehlerursachen übrig bleiben, die er im Folgenden (z. B. durch weitere Messungen) untersuchen wird.

Bei heutigen Diagnosesystemen wie die GFS wird jedem Fehlersymptom (i. d. R. werden nur Ereignisspeichereinträge berücksichtigt) ein Fehlersuchprogramm zugeordnet. Wenn genau ein Ereignisspeichereintrag vorliegt, wird das passende Programm geladen und abgearbeitet. Wenn mehrere Einträge vorhanden sind, wird der Anwender gebeten, eines auszuwählen. Die Startposition der Fehlersuche ist damit nicht die Summe der Symptome, wie bei der manuellen Fehlersuche, sondern nur ein einziges, während die übrigen Symptome nicht berücksichtigt werden.

Ein Mensch ist in der Lage auf Grund von Erfahrungen und durch Gewichtung der Symptome abzuschätzen, wie wahrscheinlich ein bestimmtes Bauteil Ursache für den vorliegenden Fehler ist. Diese Fähigkeit wird als wahrscheinlichkeitsbasiertes Schließen bezeichnet und kann auf einem Computer z. B. mit Bayes-Netzen realisiert werden. Mit den heute vorhandenen Fehlersuchprogrammen ist dies nicht möglich.

Oftmals kann ein einzelner Fehler eine ganze Reihe von Fehlersymptomen hervorrufen. Ein Diagnosesystem sollte deshalb in der Lage sein, auf Grund dieses Fehlerschauers (vgl. Abschnitt 2.1) auf die gemeinsame Ursache zu schließen. Beim Erstellen der Fehlersuchprogramme zu den einzelnen Symptomen wird jedoch immer davon ausgegangen, dass das betreffende Fehlersymptom allein steht². Der Fehler wird wahrscheinlich trotzdem gefunden, wenn alle zu dem Fehlerschauer gehörenden Programme abgearbeitet werden. Sinnvoller wäre es jedoch, wenn das Diagnosesystem auf Grund der Summe der Fehlersymptome auf eine mögliche gemeinsame Fehlerursache schließen könnte.

Zielsetzung: wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung

Um dem Ziel eines intelligenten Diagnosesystems wie in der Einleitung beschrieben, näher zu kommen, wird ein Verfahren benötigt, das mögliche Fehlerkandidaten unter der Berücksichtigung folgender Randbedingungen ermitteln kann:

- Berücksichtigung aller variantenspezifischen Besonderheiten
- das Diagnosewissen, welches die variantenspezifischen Besonderheiten enthält, soll ohne manuellen Aufwand bereitgestellt werden können (d. h. kein Expertenwissen wie in Fehlersuchprogrammen der GFS)
- Felderfahrungen sollen in Form von Ausfallwahrscheinlichkeiten einzelner Komponenten berücksichtigt werden
- es sollen auch komplexe Symptombilder (DTCs in mehreren Steuergeräten sowie Kundenwahrnehmungen) adäquat verarbeitet werden können
- zu jedem der möglichen Fehlerkandidaten soll eine Fehlerwahrscheinlichkeit berechnet werden

²Es ist theoretisch auch möglich, ein Fehlersuchprogramm für eine ganz bestimmte Kombination von Symptomen zu schreiben. Es ist jedoch praktisch nicht möglich, dies für jede beliebige Kombination zu tun.

3.2 Prüfanweisungen

Problem: Hoher Erstellungs- und Pflegeaufwand für die Fehlersuchprogramme

Die manuelle Erstellung der notwendigen Fehlersuchprogramme ist bei komplexen elektrischen Systemen mit sehr hohem Aufwand verbunden. Auf Grund der Variantenvielfalt ist es praktisch nicht möglich, alle Varianten abzudecken. Bei der Erstellung der Fehlersuchprogramme wird deshalb immer zwischen dem Erstellaufwand und dem Grad der Unterstützung für den Mechaniker abgewogen. So ist es z. B. sinnvoll, die Varianten zu beschreiben, die besonders häufig vorkommen. Eine Variantenunterscheidung wird z. B. auch für unterschiedliche Motoren vorgenommen. Die Bordnetzkomponenten des Antriebstrangs sind maßgeblich vom jeweiligen Type des Motors abhängig. Bei anderen Systemen wird versucht, die Fehlersuchprogramme möglichst allgemeingültig (ohne variantenspezifische Details) zu halten.

Bei sehr allgemein gehaltenen Fehlersuchprogrammen muss der Mechaniker das vorliegende System selbstständig analysieren und/oder zusätzliche Informationsquellen, wie Stromlaufpläne zu Hilfe ziehen. Ungenaue oder zu allgemein gehaltene Fehlersuchprogramme sorgen dafür, dass die Fehlersuche länger als nötig dauert.

Bei manuell erstellten Programmen können sich ungewollt Fehler einschleichen. Um diese zu entdecken, sind qualitätssichernde Maßnahmen in Form von Tests notwendig. Die Tests sind mit sehr hohem Aufwand verbunden, da theoretisch alle Fehler in allen Fahrzeugvarianten mit realen Fahrzeugen nachgestellt werden müssten. In der Praxis kann dies nur in Form von Stichproben erfolgen.

Werden die einzelnen Prüfanweisungen mit Hilfe eines Algorithmus automatisch generiert und kann nachgewiesen werden, dass sowohl der Algorithmus als auch die Eingangsdaten in jedem Fall korrekt sind, brauchen die generierten Prüfungen nicht getestet zu werden.

Die Tatsache, dass die Fehlersuchprogramme nach der Erstellung in jeweiligen Landessprachen aller relevanten Märkte übersetzt werden müssen, trägt weiterhin zum hohen Aufwand bei der Erstellung und Pflege der Fehlersuchprogramme bei.

Bei einem Verfahren, das Prüfanweisungen automatisch aus vorgefertigten Satzkonstrukten und Bauteilbezeichnungen zusammensetzt, ist der Übersetzungsaufwand wesentlich geringer. In diesem Fall müssen nur einmalig die Satzkonstrukte und alle Bauteilbezeichnungen übersetzt werden.

Zielsetzung: Individuelle Generierung von Prüfschritten

Um dem Ziel eines intelligenten Diagnosesystems näher zu kommen, wird ein Verfahren benötigt, das selbständig Prüfanweisungen erzeugen und ausgeben kann. Dabei sollen folgende Randbedingungen erfüllt sein:

- Berücksichtigung aller variantenspezifischen Besonderheiten
- automatische Generierung von Prüfschritten zur Überprüfung zuvor identifizierter Fehlerkandidaten
- der Mechaniker soll ohne zusätzliche Informationsquellen (z. B. Stromlaufpläne) auskommen können → hoher Detaillierungsgrad der Prüfanweisungen
- Prüfanweisungen sollen in verschiedenen Sprachen generiert werden können
- es soll die Wahrscheinlichkeit berechnet werden können, mit der das fehlerverursachende Bauteil in der Menge der geprüften Komponenten enthalten ist

3.3 Fehlersuchstrategie

Problem: Flexibilität und Reihenfolge der Prüfungen

Die Fähigkeiten und Erfahrungen des Mechanikers sind wichtige Elemente der Fehlersuche. In vielen Fällen hat der Mechaniker bereits zu Beginn der Diagnosesitzung eine Vermutung, was die Ursache des Fehlers sein könnte. Bei einem modernen Diagnosesystem sollte er deshalb die Möglichkeit haben, die Menge der verdächtigten Fehlerkandidaten sowie die Auswahl und Reihenfolge der Prüfungen zu beeinflussen. Es ist vorstellbar, dass sich ein Mechaniker eine Zeit lang vom Diagnosesystem führen lässt und zu einem bestimmten Zeitpunkt dem Diagnosesystem mitteilt, dass ihm die vorgeschlagene Maßnahme nicht als sinnvoll erscheint. Das Diagnosesystem sollte dies respektieren und weiterhin optimal unterstützen. Bei den starren Fehlersuchprogrammen ist dies nicht möglich, da der gesamte Ablauf vorgegeben ist. Dies wirkt sich u. U. nachteilig auf die Effizienz der Fehlersuche aus.

Ein starrer Ablauf, wie ihn die GFS erzwingt, sorgt dafür, dass der Mechaniker (mit all seinem Wissen) nicht in den eigentlichen Prozess der Fehlersuche eingebunden ist. Er führt lediglich die Anweisungen auf dem Bildschirm aus. Dadurch wird ein wichtiges Potenzial (das Wissen des Mechanikers) nicht genutzt.

Während einer Fehlersuche mit Hilfe der GFS werden oftmals mehrere Fehlersuchprogramme hintereinander ausgeführt. Da ein Fehlersuchprogramm keine Informationen über die Prüfschritte des zuvor ausgeführten Fehlersuchprogramms enthält, müssen u. U. bestimmte Arbeitsschritte wiederholt werden.

Ein Diagnosesystem, das die Menge und Reihenfolge der Prüfungen zur Laufzeit bestimmt, kann alle bereits durchgeführten Prüfschritte sowie die Ergebnisse der Prüfungen berücksichtigen.

Die Reihenfolge der Prüfungen hat einen hohen Einfluss auf die Effizienz der Fehlersuche. Bei der Reihenfolge der Prüfungen sollte zum einen berücksichtigt werden, wie hoch die Fehlerwahrscheinlichkeit der zu prüfenden Bauteile ist, zum Anderen sollte berücksichtigt werden, wie hoch der Aufwand zur Durchführung der jeweiligen Prüfung ist. Da die Fehlersuchprogramme weder Informationen variantenspezifischer Besonderheiten noch über zuvor durchgeführte Prüfungen enthalten, sind sie in vielen Fällen nicht optimal.

Zielsetzung: dynamischer Prüfablauf

Um dem Ziel eines intelligenten Diagnosesystems näher zu kommen, wird ein Verfahren benötigt, dass unter Berücksichtigung folgender Randbedingungen eine Sequenz aus vorgegebenen Prüfungen ermittelt:

- Berücksichtigung der Fehlerwahrscheinlichkeiten zu prüfender Komponenten bei der Auswahl der Prüfungen
- Berücksichtigung des mit der Prüfung verbundenen Aufwands (inkl. variantenspezifischer Besonderheiten) bei der Auswahl der Prüfungen
- die Ergebnisse bereits durchgeführter Prüfungen sollen bei der Auswahl berücksichtigt werden
- der Anwender soll die Prüfungen in einer anderen als der vorgeschlagenen Reihenfolge ausführen können

3.4 Zusammenfassung Kapitel 3

In diesem Kapitel wurden fünf Probleme aktueller Diagnosesysteme beschrieben und analysiert, für die im Rahmen dieser Arbeit eine Lösung erarbeitet werden soll.

1. Variantenvielfalt
2. keine Berücksichtigung von Felderfahrungen

3. Interpretation der Fehlersymptome
4. hoher Erstellungs- und Pflegeaufwand für die Fehlersuchprogramme
5. Flexibilität und Reihenfolge der Prüfungen

Es wird vermutet, dass mit Hilfe von Verfahren, welche die beschriebenen Probleme lösen, deutlich effizientere Diagnosesysteme implementiert werden können als bisher im Einsatz sind. Im Anschluss an die Beschreibung der Probleme wurden daher Ziele für die Entwicklung eines neuen intelligenten Diagnosesystems definiert. Aus diesen Zielen werden in den folgenden Kapiteln technische Anforderungen an die Implementierungen abgeleitet. Die ersten drei Probleme sollen durch ein Verfahren zur wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung (Kapitel 4) gelöst werden. Eine Lösung für das vierte Problem soll (im Kapitel 5) durch eine individuelle Generierung von Prüfanweisungen geschaffen werden. Das fünfte Problem soll durch einen dynamischen Prüfablauf (Kapitel 6) gelöst werden.

4. | Wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung

Zu den wichtigsten Aufgaben bei der Suche nach einer Fehlerursache gehört es, aus der Menge der möglichen Fehlerkandidaten diejenigen zu ermitteln, die am wahrscheinlichsten für den Fehler verantwortlich sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein System zur wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung entwickelt. Dieses System kann auf Grund von Fehlersymptomen und Ergebnissen von durchgeführten Prüfungen eine nach Wahrscheinlichkeiten gewichtete Liste mit Fehlerkandidaten ermitteln. Das Verfahren bietet gegenüber bisherigen Diagnoseverfahren folgende Vorteile:

- Berücksichtigung aller variantenspezifischen Besonderheiten
- Optimale Diagnosetiefe, da alle tauschbaren Einheiten differenziert werden können
- Berücksichtigung der Ausfallwahrscheinlichkeiten aller Bauteile (soweit bekannt)
- Berücksichtigung von Kundenwahrnehmungen zusätzlich zu DTCs¹
- Berücksichtigung von Ergebnissen bereits durchgeführter Messungen

Die Gliederung dieser Arbeit orientiert sich an den Abschnitten der Entwicklung gemäß dem V-Modell (vgl. [Ver00]). Ausgehend von der Problemanalyse (Kapitel 3) erfolgte ein Grobentwurf, der drei Module vorsieht (Kapitel 4, 5 und 6). Zu Beginn der Entwicklung der Module erfolgte eine detaillierte Anforderungsdefinition, auf die jeweils zu Beginn der Kapitel eingegangen wird. Im Rahmen des funktionalen Systementwurfs wurden die Konzepte entwickelt, die in den Kapiteln beschrieben werden. Der eigentliche Softwareentwurf sowie die Implementierung wird in der vorliegenden Arbeit nicht beschrieben². Am Ende der Kapitel wird auf die durchgeführten Tests der Module eingegangen. Die Tests erfolgten im V-Modell auf der Stufe der Systemtests (vgl. [SL05]) und haben zum Ziel, durch ausgewählte Testfälle die Softwareumsetzung der Module gegen die Anforderungsdefinition zu prüfen. Für die Tests wurden alle im Kapitel beschriebenen Verfahren in Form von Software umgesetzt. Man erfährt aus den Tests, wie die einzelnen Funktionen der Software auf verschiedene Eingangsgrößen reagieren. Dadurch können die Leistungsfähigkeit des Systems sowie mögliche Einsatzszenarien besser bewertet werden.

In den Kapiteln 5 und 6 wird beschrieben, wie Prüfanweisungen für die ermittelten Fehlerkandidaten generiert, zu einem sinnvollen Prüfablauf kombiniert und ausgegeben werden können. Die Ergebnisse der Prüfungen fließen erneut in die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung ein.

4.1 Anforderungen an die Fehlerkandidatenermittlung

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen zusammengefasst, auf deren Grundlage das System zur wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung entwickelt wurde.

Die Abbildung 4.1 zeigt die eingehenden und ausgehenden Daten der wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung. Voraussetzung sind Informationen über die elektrische Systemstruktur, d. h. über alle elektrischen Komponenten und deren Verbindungen untereinander. Auf Basis dieses Wissens soll mit Hilfe eines Bayes-Netzes für jede Komponente die Wahrscheinlichkeit

¹Ereignisspeichereinträge vgl. Erläuterung auf Seite 10

²dies würde den Rahmen der Arbeit sprengen und keinen zusätzlichen wissenschaftlichen Beitrag leisten



Abbildung 4.1.: Übersicht – wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung

berechnet werden, ob sie die Ursache für eines oder mehrere der vorliegenden Fehlersymptome ist. Das Netz soll Ausfallwahrscheinlichkeiten einzelner Komponenten berücksichtigen können. Auf Grund der berechneten Wahrscheinlichkeiten soll das System eine gewichtete Liste mit möglichen Fehlerkandidaten ausgeben.

Ausgehend von der Problemanalyse (vgl. Abschnitt 3.1) wurden für die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung folgende Anforderungen definiert:

- /1/ Das System soll anhand von eingegebenen Fehlersymptomen eine mit Wahrscheinlichkeiten gewichtete Liste mit Fehlerkandidaten generieren.
 ⇒ Umsetzung: S. 54 ff. Test: S. 139 ff.
- /2/ Die in den Steuergeräten abgelegten DTCs der Onboard-Diagnose sollen als Fehlersymptome interpretiert werden können.
 ⇒ Umsetzung: S. 37 ff. Test: S. 139 ff.
- /3/ Es sollen die Symptome (DTCs) sämtlicher Steuergeräte eines Fahrzeugs für die Ermittlung komplexer sowie unabhängiger Fehler herangezogen werden.
 ⇒ Umsetzung: S. 52 ff. Test: S. 142 ff.
- /4/ Wahrnehmungen vom Fahrer oder vom Anwender des Systems sollen eingegeben, und ebenfalls als Fehlersymptome interpretiert werden können.
 ⇒ Umsetzung: S. 40 ff. Test: S. 144 ff.
- /5/ Das Diagnosewissen, welches die variantenspezifischen Besonderheiten enthält, soll automatisch aus Konstruktions- bzw. Fertigungsdaten und Steuergerätebeschreibungsdateien abgeleitet werden können.
 ⇒ Umsetzung: S. 36 ff. Test: S. 139 ff.
- /6/ Das System soll alle im konkreten Fahrzeug verbauten elektrischen Komponenten³ für die Fehlerkandidatenermittlung berücksichtigen.
 ⇒ Umsetzung: S. 41 ff. Test: S. 145 ff.
- /7/ Bauteile, die im konkreten Fahrzeug nicht verbaut sind oder so verbaut sind, dass sie den Fehler nicht hätten verursachen können, dürfen nicht in der Fehlerkandidatenliste erscheinen.
 ⇒ Umsetzung: S. 41 ff. Test: S. 145 ff.
- /8/ Wenn mehrere vorhandene Fehlersymptome auf eine gemeinsame Ursache schließen lassen, soll das betreffende Bauteil in der Fehlerkandidatenliste stärker gewichtet werden.
 ⇒ Umsetzung: S. 45 ff. Test: S. 142 ff.
- /9/ Wenn ein verdächtigtes Bauteil im Fehlerfall weitere nicht beobachtete Symptome hätte hervorrufen müssen, bekommt es eine geringe Wahrscheinlichkeit in der Fehlerkandidatenliste.
 ⇒ Umsetzung: S. 45 ff. Test: S. 142 ff.

³Eine Komponente bezeichnet in diesem Zusammenhang immer die kleinstmögliche tauschbare Einheit (vgl. Def. Diagnosrtiefe auf S. 7. z.B. ein Steuergerät, ein Sensor, ein Stecker oder ein Leitungsabschnitt)

- /10/ Bei der Ermittlung der Fehlerwahrscheinlichkeiten sollen die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Komponenten berücksichtigt werden können.
⇒ Umsetzung: S. 46 ff. Test: S. 139 ff.
- /11/ Das System soll auch bei ungenauen oder fehlenden Ausfallwahrscheinlichkeiten von Komponenten sinnvolle Ergebnisse liefern.
⇒ Umsetzung: S. 46 ff. Test: S. 146 ff.
- /12/ Das System soll mit Situationen umgehen können, in denen gleichzeitig mehrere unabhängige Fehler vorhanden sind.
⇒ Umsetzung: S. 53 ff. Test: S. 144 ff.
- /13/ Wenn zu einem bestimmten Fehlerkandidaten ein Befund (Ergebnis einer Prüfung) vorliegt, soll dieser in das System eingegeben werden können und zu einer Aktualisierung der Fehlerkandidatenliste führen.
⇒ Umsetzung: S. 55 ff. Test: S. 139 ff.
- /14/ Bei mehreren unabhängigen Fehlern darf das Ergebnis einer Prüfung bezüglich eines bestimmten Fehlerkandidaten nur Auswirkungen auf die Fehlerwahrscheinlichkeiten der Bauteile aus dem gleichen Teilsystem haben.
⇒ Umsetzung: S. 53 ff. Test: S. 144 ff.
- /15/ Wenn ein Bauteil aus einer Menge möglicher Fehlerkandidaten des gleichen Teilsystems als fehlerfrei identifiziert wurde, muss sich die Fehlerwahrscheinlichkeit der übrigen Fehlerkandidaten erhöhen.
⇒ Umsetzung: S. 45 ff. Test: S. 139 ff.
- /16/ Wenn ein Bauteil aus einer Menge möglicher Fehlerkandidaten des gleichen Teilsystems als fehlerhaft identifiziert wurde, muss sich auf Grund der deutlich niedrigeren Wahrscheinlichkeit von Mehrfachfehlern die Fehlerwahrscheinlichkeit der übrigen Fehlerkandidaten signifikant verringern.
⇒ Umsetzung: S. 46 ff. Test: S. 139 ff.
- /17/ Die Erstellung des Bayes-Netzes soll auf üblicher Hardware⁴ maximal 30 sec. in Anspruch nehmen.
⇒ Umsetzung: S. 47 ff. Test: S. 148 ff.
- /18/ Die Aktualisierung der Fehlerkandidatenliste nach Eingabe eines Befundes soll auf üblicher Hardware maximal 5 sec. in Anspruch nehmen.
⇒ Umsetzung: S. 47 ff. Test: S. 148 ff.

Bekannte Verfahren

Es sind einige Systeme bekannt, die bereits einen Teil der genannten Anforderungen erfüllen. In einigen Werken der Volkswagen AG wird das Diagnosesystem *Intelligent Finder* eingesetzt (vgl. [Mas07]). Dieses System ermöglicht eine Fehlerkandidatenermittlung auf Basis fahrzeugindividueller Strukturdaten (vgl. Abschnitt 4.2.1). Das verwendete Verfahren zur Strukturanalyse ist in [Har07] sowie in [SEB⁺a] und [SEB⁺b] beschrieben. Es handelt sich dabei nicht um ein wahrscheinlichkeitsbasiertes System. Daher können auch keine Fehlerwahrscheinlichkeiten berechnet werden. Es sind jedoch feste Gewichtungen zu den einzelnen Komponenten hinterlegt, die bei der Anzeige der Fehlerkandidatenliste die Reihenfolge der Elemente bestimmt. Wenn eine Komponente als möglicher Fehlerkandidat für mehrere Symptome in Frage kommt, erhöht sich deren Gewichtung.

In [Lük03] wird ein wahrscheinlichkeitsbasiertes On-Board-Diagnosesystem zur Diagnose dynamischer und mechatronischer Fahrzeug-Systeme beschrieben. Das Verfahren verwendet manuell

⁴zum Zeitpunkt des Erstellens dieser Arbeit ist handelsübliche Hardware (die auch in einer Werkstatt eingesetzt werden kann) z. B. ein Laptop mit 2GHz Intel Core2Duo Prozessor und 1GB Arbeitsspeicher.

erstellte Bayes-Netze um ausgewählte Teilsysteme eines Fahrzeugs zu diagnostizieren. Für die Diagnose eines kompletten Fahrzeug-Bordnetzes ist dieses Verfahren nicht geeignet. Manuell erstellte Bayes-Netze haben prinzipiell das gleiche Problem wie manuell erstellte Modelle für modellbasierte Verfahren (vgl. Abschnitt 2.1.3). Die Erstellung eines solchen Netzes ist mit sehr hohem Aufwand verbunden. Das erstellte Bayes-Netz ist nur für eine konkrete Fahrzeugvariante verwendbar. Die hohe Variantenvielfalt moderner Fahrzeuge lässt sich damit nicht abbilden.

In [HBR95], [JKK⁺00], [GB01] und [SS04] werden wahrscheinlichkeitsbasierte Diagnosesysteme für technische Systeme und Anlagen beschrieben, welche mit Hilfe von Bayes-Netzen mögliche Fehlerursachen ermitteln können. Die dafür notwendigen Netze müssen jedoch auf Basis von Expertenwissen manuell erstellt werden. Auf Grund der Struktur der verwendeten Bayes-Netze ist keines der beschriebenen Verfahren geeignet, um damit komplexe Systeme wie im Abschnitt 4.4 beschrieben zu diagnostizieren.

Zum Entstehungszeitpunkt dieser Arbeit ist keine technische Lösung bekannt, die alle ermittelten Anforderungen befriedigend erfüllen kann.

4.2 Verfügbares Diagnosewissen

Diagnosesysteme fallen in die Kategorie der wissensbasierten Systeme. Sie benötigen eine Wissensbasis und Verfahren zur Verarbeitung des Wissens. Im Folgenden werden die Elemente der Wissensbasis beschrieben, die für die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung benötigt werden.

4.2.1 Strukturbeschreibende Daten

Um eine präzise Fehlerdiagnose stellen zu können, ist es nötig, dass dem Diagnosesystem sehr präzise Informationen über die im konkreten Fahrzeug verbauten elektrischen Systeme zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund wurde ein Format für einen Datensatz entwickelt, der eine fahrzeugindividuelle elektrische Strukturbeschreibung enthält. Der Datensatz enthält alle elektrischen Bauteile wie z.B. Steuergeräte, Sensoren, Aktoren, Stecker und Leitungen. Jedes Bauteil ist mit einer eindeutigen ID versehen. Die Struktur des Datensatzes drückt die elektrischen Verbindungen zwischen den Komponenten aus. So ist z.B. ersichtlich, über welchen Pin eines bestimmten Steckers eine Leitung mit einem Steuergerät verbunden ist. Aus dem Datensatz lässt sich dadurch jederzeit ein vollständiger, fahrzeugindividueller Stromlaufplan generieren. Über die ID können die elektrischen Komponenten aus dem Datensatz mit Zusatzinformationen verknüpft werden. Folgende Informationen sind u. a. möglich:

- Querschnitt und Farbe der Leitungen
- Teilenummern der Komponenten
- Abbildungen zu den Komponenten (vgl. Abschnitt 5.2)
- Ausfallwahrscheinlichkeiten der Komponenten (vgl. Abschnitt 4.2.4)
- Aufwand für Aus- und Einbau der Komponenten (vgl. Abschnitt 6.3)

Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten, dem Diagnosesystem die Datensätze mit den strukturbeschreibenden Daten zur Verfügung zu stellen:

1. Das Diagnosesystem kennt alle Fahrzeugvarianten, die gebaut werden können und wählt abhängig vom Fahrzeug die richtige Variante aus.
2. Für jedes produzierte Fahrzeug wird ein individueller Datensatz generiert und dauerhaft gespeichert. Das Diagnosesystem holt sich diesen bei Bedarf.

Für ein aktuelles Fahrzeug können theoretisch mehrere Milliarden verschiedene Bordnetze für unterschiedliche Ausstattungskombinationen gebaut werden. Die Zahl der tatsächlich verbauten Bordnetz-Varianten in Fahrzeugen ist wesentlich geringer. Aus diesem Grund ist die Variante 1

nicht sinnvoll. Auch wenn bei Variante 2 die Gefahr besteht, dass eine bestimmte Ausstattungsvariante häufig von Kunden gekauft wird und dadurch der gleiche Datensatz mehrfach abgelegt werden muss, ist diese Variante sinnvoller.

Damit der Datensatz auch Jahre später in der Werkstatt verwendet werden kann, muss er dauerhaft gespeichert werden. Eine Möglichkeit dafür wäre die Speicherung des Datensatzes im Fahrzeug z. B. im Flash-Speicher eines Steuergerätes. Der zusätzlich benötigte Speicher (ca. 100 KByte) bedeutet jedoch zusätzliche Kosten für jedes Fahrzeug. Des Weiteren besteht die Gefahr, dass durch einen Defekt oder Austausch des Steuergerätes der Datensatz verloren geht. Eine wesentlich kostengünstigere Lösung zur Speicherung der Datensätze ist ein zentraler Server. Die Kosten für einen solchen Server sind verschwindend gering im Vergleich zu den Mehrkosten für jedes Fahrzeug. Damit das Diagnosesystem bei Variante 2 auf die strukturbeschreibenden Daten zugreifen kann, liest es zunächst die Fahrgestellnummer aus dem Fahrzeug aus und fragt dann bei dem zentralen Server den entsprechenden Datensatz an.

Es gibt drei Möglichkeiten, zu welchem Zeitpunkt der fahrzeugindividuelle Datensatz generiert werden kann:

1. Generierung während der Produktion des Fahrzeugs – dauerhafte Speicherung
2. Generierung bei jeder Anfrage – keine Speicherung auf dem Server
3. Generierung des Datensatzes bei Bedarf – Speicherung für einen begrenzten Zeitraum

Während ein Fahrzeug gefertigt wird ist genau bekannt, wie eine zu verbauende Komponente oder ein Leitungsstrang beschaffen sind. Da es jedoch regelmäßig Modellpflegen gibt, kann ein bestimmtes Ausstattungsmerkmal zu einem anderen Zeitpunkt anders umgesetzt sein. Bei der Volkswagen AG werden deshalb zurzeit die Datensätze während der Produktion des Fahrzeugs generiert und über die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs gespeichert (Variante 1). Um Speicherplatz auf dem Server zu sparen, ist es auch möglich, den Datensatz erst zu generieren, wenn er vom Diagnosesystem angefragt wird. Der Server muss dafür die Zuordnung zwischen Fahrgestellnummer und Ausstattung kennen. Weiterhin muss dem Server bekannt sein, wie zum Produktionszeitpunkt die Ausstattungsmerkmale realisiert wurden (welche Komponenten und Leitungsstränge). Die Generierung der Daten im Bedarfsfall nimmt jedoch zusätzlich Zeit in Anspruch, was dazu führt, dass der Mechaniker in der Werkstatt warten muss, bis das System eine Diagnose stellen kann. Da dies innerhalb des Werkstattaufenthalts eines Fahrzeugs mehrmals der Fall sein kann, ist Variante 2 nicht sinnvoll. Die Variante 3 stellt einen Kompromiss dar, wenn nicht genügend Kapazität für Variante 1 auf dem Server verfügbar ist. Die Generierung erfolgt dann maximal einmal pro Werkstattbesuch.

Neben dem in dieser Arbeit beschriebenen Diagnosesystem gibt es noch weitere Einsatzbereiche für einen solchen strukturbeschreibenden Datensatz. [Ehl03] beschäftigt sich mit einem Verfahren zur Sicherstellung der Systemintegrität eines Fahrzeugs. In [Gri07] wird ein Verfahren zur Feststellung der Sicherheit von vernetzten, elektronischen Systemen im Kraftfahrzeug behandelt. Beide Verfahren verwenden einen fahrzeugindividuellen Datensatz zur Beschreibung aller elektrischen Komponenten um Veränderungen am Fahrzeug zu erkennen, welche u. U. die Verkehrssicherheit beeinträchtigen könnten. In diesen Arbeiten werden auch die Möglichkeiten zur Erstellung, Speicherung und Bereitstellung eines solchen Datensatzes ausführlich behandelt.

4.2.2 Beschreibung der Diagnosefunktionen

Neben den fahrzeugindividuellen Strukturdaten gibt es noch weitere wichtige Daten, die für das hier vorgestellte Diagnosesystem benötigt werden. Jedes Steuergerät besitzt einen genau festgelegten Umfang an Diagnosefunktionen. Von jeder Diagnosefunktion ist bekannt, über welchen Fehlercode (DTC) sie sich äußert und welche Anschlüsse am Steuergerät sie überwacht.

Die Abbildung 4.2 stellt einen fiktiven Ausschnitt aus einem Stromlaufplan eines Fahrzeugs dar. Das Steuergerät kann das Signal eines analogen Sensors auswerten und eine Lampe ansteuern.

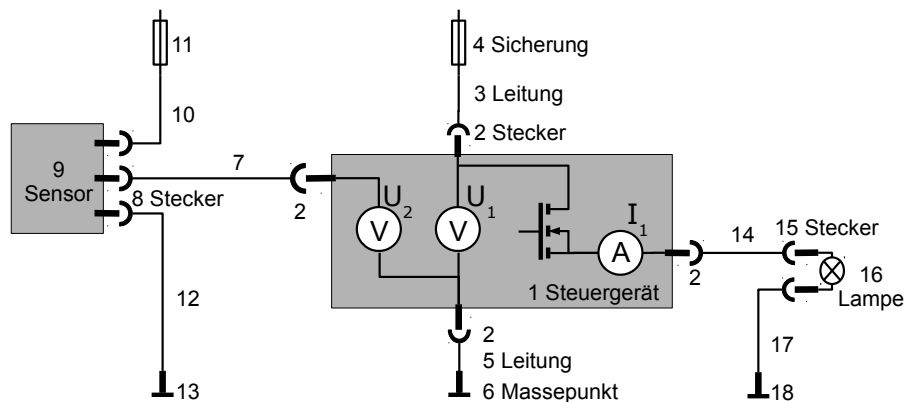


Abbildung 4.2.: Beispiel zur Extraktion von Wirkketten aus einem Stromlaufplan

Darüber hinaus kann es sechs verschiedene Fehlerfälle diagnostizieren. Im Fehlerfall legt das Steuergerät einen entsprechenden DTC im Speicher ab. Die Tabelle 4.1 beschreibt die Fehlerfälle und gibt den entsprechenden Fehlertext an.

DTC	Symptom	Fehlertext
DTC 1	$U_1 < 6V$	Fehler der Spannungsversorgung
DTC 2	$U_2 < 1V$	Sensor Unterbrechung oder Kurzschluss nach Masse
DTC 3	$U_2 \approx U_1$	Sensor Defekt oder Kurzschluss nach Plus
DTC 4	$U_2 > 5V \wedge U_2 < U_1$	Sensor Defekt
DTC 5	$I_1 < 1A$	Lampe defekt oder Kurzschluss nach Plus
DTC 6	$I_2 > 3A$	Kurzschluss nach Masse

Tabelle 4.1.: Exemplarische Beschreibung der vom Steuergerät erkennbaren Fehlerzustände

In diesem Beispiel sollte das Signal vom Sensor zwischen 1V und 5V liegen. Alle Werte außerhalb dieses Bereiches werden als Fehler interpretiert. Werden am Eingang 0V gemessen, könnte dies auf eine Leitungsunterbrechung zwischen Sensor und Steuergerät zurückzuführen sein. Es könnte jedoch auch die Spannungsversorgung des Sensors, der Sensor oder das Steuergerät selbst defekt sein. Des Weiteren könnte ein Kurzschluss nach Masse (z. B. durch eine Beschädigung der Leitung oder eines Steckers) vorliegen. Werden am Eingang 12V gemessen, könnte ein Kurzschluss nach Plus, eine Unterbrechung der Masseleitung ein Defekt des Sensors oder ein Fehler im Steuergerät vorliegen. Eine Eingangsspannung von 7V lässt sich, solange die Versorgungsspannung des Fahrzeugs um 12V liegt, nur durch einen Defekt des Sensors erklären.

4.2.3 Ermittlung der Wirkketten

Mit Hilfe der fahrzeugindividuellen Strukturdaten und der Beschreibung der Diagnosefunktionen lässt sich ermitteln, welche Bauteile von den einzelnen Diagnosefunktionen überwacht werden. Die Tabelle 4.2 stellt für das Beispiel aus dem letzten Abschnitt dar, welche Komponenten von den Diagnosefunktionen überwacht werden. Zunächst ist zu erkennen, dass alle Komponenten von mindestens einer Diagnosefunktion überwacht werden. Das bedeutet, dass egal welche Komponente defekt ist, immer ein DTC abgelegt wird. Dies wird als vollständige Diagnoseabdeckung des Systems bezeichnet.

Aus der Tabelle ist jedoch auch ersichtlich, dass auf Grund eines DTCs nicht eindeutig auf eine Fehlerursache geschlossen werden kann. Dieser Effekt wird als begrenzte Diagnosetiefe bezeichnet (vgl. Def. S. 7). Mit Hilfe solcher Tabellen lassen sich Diagnosesysteme befüllen, wie sie z.B. in [Har07] beschrieben sind. Solche Diagnosesysteme geben auf Grund eines Fehlersymptoms alle in Frage kommenden Bauteile aus.

differenzierbare Fehler	Komponenten aus Abbildung 4.2																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
DTC 1	×	×	×	×	×	×												
DTC 2	×	×					×	×	×	×	×							
DTC 3	×	×					×	×	×			×	×					
DTC 4	×								×									
DTC 5	×	×												×	×	×	×	×
DTC 6	×	×												×				

Tabelle 4.2.: Ermittlung von Wirkketten – Zuordnung Fehlerkandidaten zu Fehlersymptomen

Das Diagnosesystem Intelligent Finder, das z.B. in einigen Werken der Volkswagen AG eingesetzt wird, funktioniert ebenfalls nach diesem Prinzip. Die strukturbeschreibenden Daten (vgl. Abschnitt 4.2.1) werden für dieses System automatisch während der Fertigung der Fahrzeuge generiert und in eine Matrix, vergleichbar mit Tabelle 4.2, überführt. Das System kennt den Verbauort aller Komponenten und ist dadurch in der Lage, Fehlerkandidaten in einem 3D-Fahrzeugmodell graphisch darzustellen.

Die Generierung solcher Tabellen ist automatisch mit Hilfe einer graphentheoretischen Analyse des Stromlaufplans möglich. Dabei wird ausgehend vom Stromlaufplan ein Graph (vgl. Abschnitt 2.2.2) generiert, der für jede Komponente im Stromlaufplan einen Knoten enthält. Entsprechend der elektrischen Verbindungen der Komponenten untereinander werden die Knoten durch Kanten verbunden. Ausgehend von dem Pin am Steuergerät, der durch den bzw. die DTCs überwacht wird, werden alle erreichbaren Knoten im Graphen gesucht (vgl. [PD00]) und der Pfad bis dorthin ermittelt. Abhängig von der Art des DTCs werden dabei unterschiedliche Regeln für die Ermittlung erreichbarer Knoten angewendet. Für jeden so ermittelten Knoten wird in der o.g. Tabelle ein Kreuz in der zum DTC gehörenden Zeile gesetzt.

Zur Ermittlung der Wirkkette des DTC1 im Beispiel werden die Pfade von den Stromversorgungspins des Steuergerätes bis zur zugehörigen Sicherung⁵ sowie bis zum Massepunkt ermittelt. Die Wirkkette zum DTC2 umfasst den Pfad zum Sensor einschließlich dessen Spannungsversorgung bis zur zugehörigen Sicherung. Für die Wirkkette des DTC3 wird der Pfad über den Sensor bis zur Fahrzeugmasse ermittelt. Für den DTC4 wird zunächst der Pfad bis zum Sensor ermittelt. Anschließend werden Bauteile entfernt, welche diese spezielle Fehlerart nicht hervorgerufen haben können. Leitungen und Stecker können nur die Fehlerarten Unterbrechung, Kurzschluss nach Plus sowie Kurzschluss nach Masse hervorrufen. Unplausible Signale, die nicht in diese Kategorie fallen, können nur durch Fehler der entsprechenden Quelle oder Senke hervorgerufen werden. Dadurch enthält die Wirkkette für DTC4 nur zwei Elemente.

Wird das beschriebene Vorgehen auf alle Fehlersymptome (DTCs) und den gesamten Stromlaufplan eines Fahrzeugs angewendet, entsteht ein Datensatz, der alle für die Diagnose relevanten Wirkketten eines Fahrzeugs enthält. Mit Hilfe dieses Datensatzes kann das Diagnosesystem selbständig von den Fehlersymptomen auf mögliche Fehlerkandidaten schließen. Dies geschieht in folgenden Schritten:

- Fehlersymptom (DTC) ⇒ Diagnosefunktionen im Steuergerät
- Diagnosefunktionen ⇒ Überwachte Anschlüsse (Pins) am Steuergerät
- Anschluss am Steuergerät ⇒ Wirkketten
- Wirkketten ⇒ Bauteile (Fehlerkandidaten)

⁵Vollständigerweise müsste der Pfad bis zur Batterie und zum Generator gehen. Es hat sich jedoch als vorteilhaft erwiesen, jeweils nur bis zu einer der Hauptsicherungen zu gehen und für den Anschluss von Batterie und Generator eine separate Wirkkette zu erzeugen.

Berücksichtigung von Kundenwahrnehmungen

Neben den DTCs soll das System auch Kundenwahrnehmungen (Beobachtungen durch Kunden oder Mechaniker) als Fehlersymptome interpretieren können. Kundenwahrnehmungen betreffen z.B. das Funktionieren bzw. das Nichtfunktionieren eines Systems oder Teilsystems. Die Auswertung von Kundenwahrnehmungen ist vor allem dann sinnvoll, wenn keine oder eine zu ungenaue⁶ On-Bord-Diagnose vorhanden ist. Das beschriebene Diagnosesystem ist so ausgelegt, dass nach dem Auslesen der DTCs aus dem Fahrzeug Kundenwahrnehmungen eingegeben werden können. Dies geschieht durch Beantwortung einzelner Fragen darüber, ob ein bestimmtes Symptom vorhanden ist oder nicht.

Das Diagnosesystem wertet dafür eine Datei mit Expertenwissen aus, welche die Fragen nach den Symptomen sowie jeweils einen Verweis auf die betreffenden Wirkketten enthält. Diese Datei ist nicht fahrzeugspezifisch, sondern für alle Varianten gleich. Das Diagnosesystem fragt jedoch nur Symptome ab, die zu den im konkreten Fahrzeug vorhandenen Wirkketten korrespondieren. Dadurch wird sichergestellt, dass nur nach relevanten Kundenwahrnehmungen gefragt wird. Die Auswertung der Fehlersymptome, die der Kunde beobachtet hat, ist analog zur Auswertung der DTCs.

4.2.4 Felddaten

Für ein wahrscheinlichkeitsbasiertes Diagnosesystem sind Ausfallwahrscheinlichkeiten von Komponenten wichtige Eingangsgrößen. Diese Informationen können durch Auswertung von Daten über Fehler und Reparaturfälle aus den Werkstätten ermittelt werden. Auf Grund der großen Stückzahl an Fahrzeugen, die im Volkswagen-Konzern gebaut und später in den Vertragswerkstätten gewartet werden, gibt es viele Informationen, die zu aussagekräftigen Statistiken zusammengefasst werden können. Dazu gehören z.B. Informationen darüber, welche Reparaturmaßnahmen an den einzelnen Fahrzeugen durchgeführt wurden und welche Ersatzteile beschafft wurden. Auch die Diagnosesysteme, die heute in den Werkstätten eingesetzt werden, können die vorhandenen Ereignisspeichereinträge und alle durchgeführten Prüfschritte protokollieren und an einen zentralen Server versenden.

Für das hier vorgestellte Diagnosesystem können aus den Statistiken wichtige Eingangsgrößen abgeleitet werden. So lässt sich zu elektrischen Komponenten eine A-priori-Ausfallwahrscheinlichkeit bestimmen. Diese Kenngröße sagt aus, wie häufig eine bestimmte Komponente über alle vergleichbaren Fahrzeuge betrachtet ausfällt. Wie in [BL04] beschrieben, wird die Ausfallwahrscheinlichkeit typischerweise in Abhängigkeit vom Alter oder der Laufleistung des Fahrzeugs ermittelt. Bei elektrischen Systemen, werden diese Größen meistens in Abhängigkeit vom Produktionszeitpunkt des Fahrzeugs ermittelt. Auch wenn diese Informationen noch nicht zur Verfügung stehen (z.B. für Fahrzeuge oder Fahrzeugsysteme, die noch sehr neu sind), lässt sich durch den Vergleich mit ähnlichen Komponenten oder anderen Fahrzeugprojekten eine qualitative Aussage treffen.

4.3 Generierung der Bayes-Netze

Auf Basis der beschriebenen Daten wird im Diagnosesystem ein Bayes-Netz in drei Schritten generiert. Im ersten Schritt wird für jede Variable innerhalb der abzubildenden Domäne ein entsprechender Knoten im Netz erstellt. Im zweiten Schritt werden die realen Abhängigkeiten zwischen den Knoten identifiziert und in Form von Kanten in das Netz übertragen. Der dritte Schritt besteht darin, die bedingten Wahrscheinlichkeiten zu ermitteln und zusammen mit den A-Priori-Wahrscheinlichkeiten in die Tabellen der Knoten zu überführen.

Das Netz wird anhand von Informationen aus der elektrischen Strukturbeschreibung sowie der Beschreibung möglicher Fehlersymptome generiert. Dabei wird für jedes mögliche Fehlersymptom

⁶geringe Diagnosetiefe vgl. S. 7

ein Knoten mit zwei Zuständen („Symptom vorhanden“ bzw. „Symptom nicht vorhanden“) und für jedes Bauteil (potentieller Fehlerkandidat) ein Knoten mit den beiden Zuständen „in Ordnung“ (i.O.) und „nicht in Ordnung“ (n.i.O.) angelegt.

4.3.1 Struktur der Netze

Abhängigkeiten zwischen Symptomen und Fehlerkandidaten (Variablen) werden durch Kanten zwischen den Knoten des Netzes repräsentiert. Bei der Generierung des Netzes muss deshalb festgestellt werden, welche Variablen sich gegenseitig beeinflussen. Da der Defekt einer Komponente (z. B. eines Steuergerätes) normalerweise nicht die unmittelbare Ursache für den Defekt einer anderen Komponente ist, werden die Komponentenknöten nicht durch Kanten verbunden. Das bedeutet, die Komponentenknöten des Netzes sind unabhängig voneinander (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Ebenso sind die Symptome voneinander unabhängig. Es gibt Fehlersituationen, die mehrere Ereignisspeichereinträge hervorrufen (vgl. Def. Fehlerschauer S. 7). Die Ursache dafür liegt aber nicht in der Abhängigkeit der Symptome, sondern darin, dass die gleichen Bauteile durch mehrere unabhängige Diagnosefunktionen überwacht werden, die im Fehlerfall alle aktiv werden. Symptomknöten werden deshalb, genau wie Komponentenknöten, nicht durch Kanten verbunden.

Abhängigkeiten bestehen lediglich zwischen Fehlerkandidaten und Symptomen. Diese werden durch die Beschreibung der Diagnosedienste und der strukturbeschreibenden Daten geliefert. Um diese Abhängigkeiten umzusetzen, werden innerhalb des Netzes Knöten eingefügt, welche die Wirkketten repräsentieren. Sie haben genau wie die Komponentenknöten die Zustände „i.O.“ und „n.i.O.“. Wirkkettenknöten haben die Aufgabe, Komponenten eines elektrischen Teilsystems zusammenzufassen. Ihr Zustand gibt an, ob ein Fehler in diesem Teilsystem vermutet wird. Gemäß der Beschreibungen der Diagnosefunktionen und deren überwachten Teilsystemen werden die Wirkkettenknöten mit den Symptomknöten verbunden.

Eine Wirkkette ist im einfachsten Fall eine Reihenschaltung von Komponenten und kann als Strompfad innerhalb des Stromlaufplans interpretiert werden. In der Praxis werden jedoch die Pfade für die Stromversorgung einer Komponente immer mit einbezogen, da diese für die Funktion eines Teilsystems ebenfalls relevant sind (vgl. Abschnitt 4.2.3). Der Ausfall einer Komponente führt dazu, dass die gesamte Wirkkette nicht mehr funktioniert. Je nach Art der Betrachtung kann dies als logische OR-Verknüpfung (nicht ausschließende Disjunktion) oder AND-Verknüpfung (Konjunktion) interpretiert werden.

- Sobald mindestens eine Komponente ($K_1 \vee K_2 \vee K_3 \vee \dots$) im Zustand „n.i.O.“ ist, nimmt die gesamte Wirkkette den Zustand „n.i.O.“ ein.
- Es müssen sich alle Komponenten ($K_1 \wedge K_2 \wedge K_3 \wedge \dots$) im Zustand „i.O.“ befinden, damit die Wirkkette im Zustand „i.O.“ ist.

Die Abbildung 4.3 stellt zwei mögliche Implementierungen einer logischen OR-Verknüpfung mit Hilfe eines Bayes-Netzes dar.

Oberhalb der Struktur der Bayes-Netze sind in Abbildung 4.3 exemplarisch die A-Priori-Wahrscheinlichkeiten der Knöten angegeben, die keine Elternknöten haben. Unterhalb sind Tabellen mit bedingten Wahrscheinlichkeiten (CPT⁷, vgl. Abschnitt 2.2.4) dargestellt. Diese Tabellen sind folgendermaßen zu lesen: Wenn im linken Beispiel der Knöten X im Zustand 0 und der Knöten Y in Zustand 0 sind, ist die Wahrscheinlichkeit, dass Knöten Z im Zustand 0 ist 1,0 und die Wahrscheinlichkeit, dass Knöten Z im Zustand 1 ist 0,0. Haben X und Y andere Belegungen, kehren sich die Wahrscheinlichkeiten für den Zustand von Knöten Z um.

Der wichtigste Unterschied der beiden möglichen Implementierungen einer OR-Verknüpfung liegt in der Richtung der Pfeile. Das allgemeine Verständnis einer binären OR-Verknüpfung ist, dass

⁷CPT – conditional probability table dt. Tabelle bedingter Wahrscheinlichkeiten

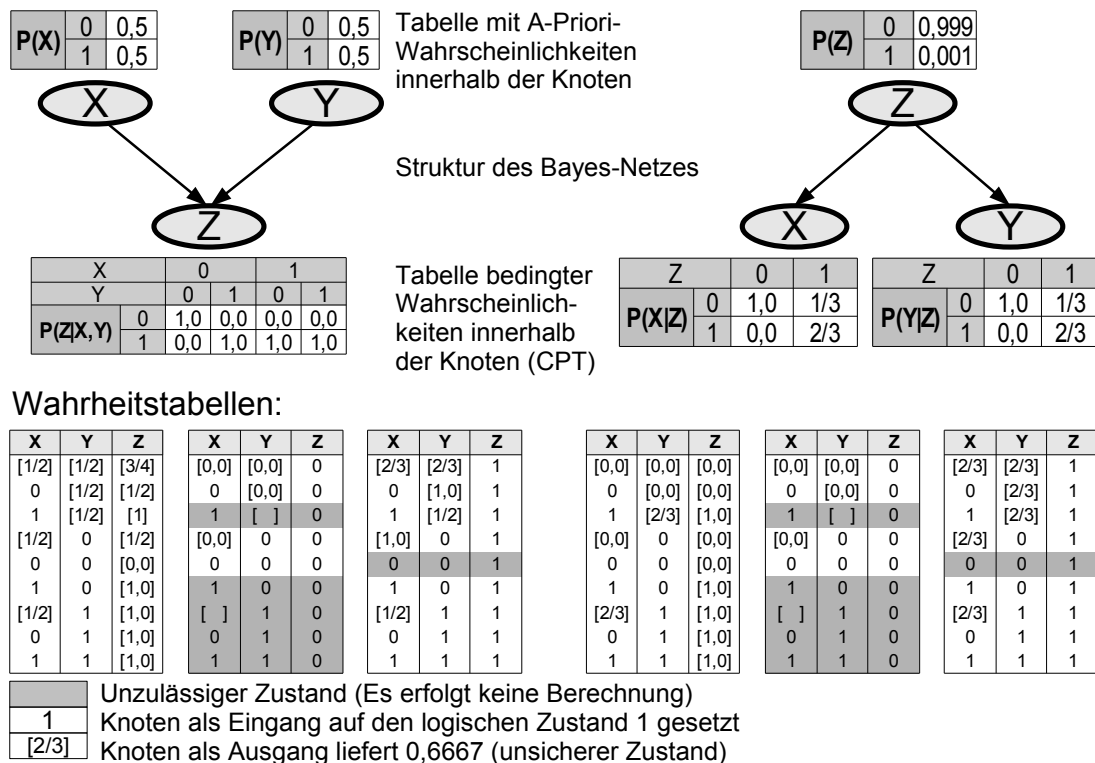


Abbildung 4.3.: Alternative Bayes-Netze zur Modellierung einer logischen OR-Verknüpfung (linke Seite entspricht dem gewünschten Verhalten)

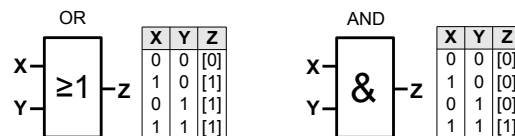


Abbildung 4.4.: Logische OR- und AND-Verknüpfungen

die beiden Eingänge X und Y gegeben sind und der Ausgang Z entsprechend der Logik ermittelt wird (vgl. Abbildung 4.4). Ein Bayes-Netz kann jedoch, wie im Abschnitt 2.2 beschrieben, mit unvollständigen Informationen umgehen und sowohl vorwärts als auch rückwärts schließen. Die Wahrheitstabellen im unteren Teil der Abbildung 4.3 haben aus diesem Grund mehr als die bekannten 2^2 Einträge, die man von einer binären OR-Verknüpfung kennt.

Eine „1,0“ oder eine „0,0“ in den Tabellen bedeutet, dass für den betreffenden Knoten eine Evidenz entweder für den Zustand 0 oder 1 gesetzt wurde. Der Wert in eckigen Klammern gibt den vom Netz berechneten Wert an, wenn für den Knoten keine Evidenz gesetzt ist. Die grau hinterlegten Zeilen stellen eine Verletzung der im Netz hinterlegten Logik dar und sagen aus, dass auf Grund der eingegebenen Daten keine Berechnung erfolgt.

Es ist zu erkennen, dass, sobald beide Eingangsgrößen (X und Y) gegeben sind und das Netz den Zustand von Z ermitteln soll, beide Implementierungen das gleiche Ergebnis wie in Abbildung 4.4 liefern. Es muss also entschieden werden, welches Verhalten gewünscht ist, wenn andere Eingangsgrößen vorliegen. In der linken Implementierung sind X und Y voneinander bedingt abhängig (vgl. konvergierende Verbindungen im Abschnitt 2.2.3 und Abbildung 2.4), sobald Z gegeben ist. Bei der rechten Implementierung sind X und Y in diesem Fall bedingt unabhängig.

Bei $Z = 1$ ist z. B. der Zustand von Y auf der linken Seite abhängig vom Zustand X , jedoch auf der rechten Seite nicht. $Z = 1$ bedeutet in diesem Fall, dass die Wirkkette mindestens eine fehlerhafte

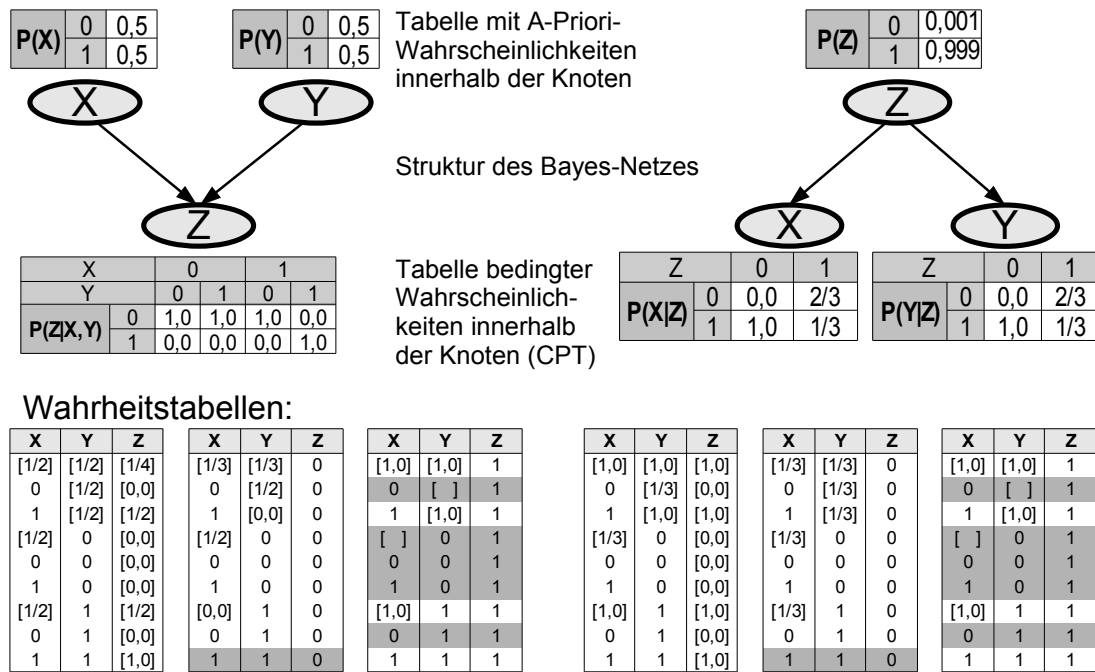


Abbildung 4.5.: Alternative Bayes-Netze zur Modellierung einer logischen AND-Verknüpfung

Komponente ($X = 1$ und/oder $Y = 1$) enthält. Folgerichtig belasten beide Netze die Knoten X und Y jeweils mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von $2/3$. Wenn bekannt ist, dass die Komponente X nicht fehlerhaft ist, erwarten wir, dass das Diagnoseverfahren darauf schließt, dass Komponente Y defekt sein muss. Wenn Komponente X hingegen als defekt erkannt wurde, soll die Komponente Y entlastet werden. Da jedoch nicht auszuschließen ist, dass Y ebenfalls defekt ist, erscheint eine Fehlerwahrscheinlichkeit von $1/2$ als logisch.

Die Darstellung der Implementierung auf der linken Seite in Abbildung 4.3 entspricht genau dem gewünschten Verhalten zur Belastung und Entlastung von Fehlerkandidaten und wird deshalb verwendet. Selbstverständlich kann ein Bayes-Netz nach diesem Muster nicht nur mit den beiden Zuständen 1 und 0 (wie in den Tabellen angegeben) arbeiten, sondern es kann mit beliebigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen rechnen. Auch werden im praktischen Einsatz i. d. R. keine Fehlerwahrscheinlichkeiten von 0,5 angenommen, sondern wesentlich geringere. Dies hat zur Folge, dass bei einer Entlastung, wie oben beschrieben, die Fehlerwahrscheinlichkeit nicht nur auf $1/2$, sondern auf einen wesentlich geringeren Wert sinkt.

Durch Invertieren von X, Y und Z einer OR-Verknüpfung erhält man eine AND-Verknüpfung. Anhand der Wahrheitstabellen in Abbildung 4.4 kann dies nachvollzogen werden. Durch Vertauschen der logischen Zustände (0 und 1) der Bayes-Netz-Knoten aus Abbildung 4.3 erhält man ein Bayes-Netz, das eine AND-Verknüpfung darstellt. In Abbildung 4.5 sind wiederum zwei Varianten dargestellt. Die Strukturen der Netze für die AND- und OR-Verknüpfungen sind die gleichen.

Einfaches Beispiel

Zur Veranschaulichung der einzelnen Schritte zeigt Abbildung 4.6 einen Ausschnitt aus dem Stromlaufplan der Klimaanlage eines Fahrzeugs mit Steuergerät sowie eine daran mit vier Leitungen angeschlossene Luftklappe mit Stellmotor und Potentiometer. Die Leitung 1 ist eine +5V Versorgungsspannung für alle Sensoren der Klimaanlage. Es gibt eine Diagnosefunktion, die diese Spannung überwacht. Im Falle eines Kurzschlusses gegen Masse oder +12V wird der Fehlercode DTC A im Steuergerät abgelegt. Die Leitungen 2 und 3 dienen der Verbindung des Steuergerätes mit dem Stellmotor der Umluftklappe. Die Leitung 4 verbindet das Steuergerät mit

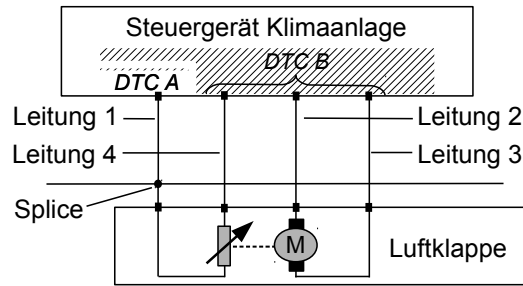


Abbildung 4.6.: Ausschnitt Stromlaufplan Klimaanlage

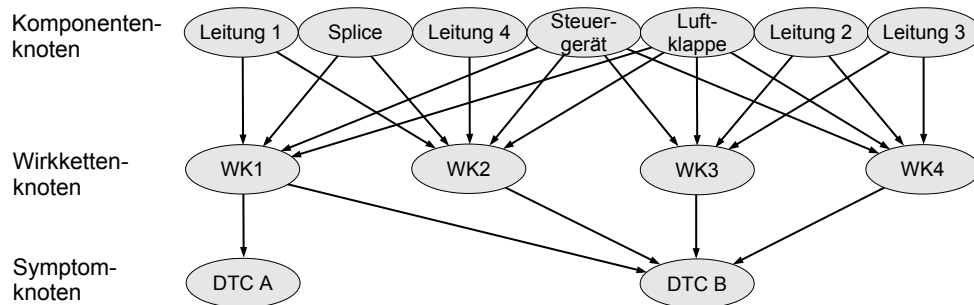


Abbildung 4.7.: Bayes-Netz mit Wirkkettenknoten (WK1 bis WK4)

dem Potentiometer, welches den aktuellen Winkel der Umluftklappe misst. Das Potentiometer ist über einen Splice mit der Referenzspannung verbunden. Eine zweite Diagnosefunktion überwacht die Funktion der Luftklappe und trägt im Fehlerfall den DTC B ein, indem sie die Spannung am Potentiometer bei angesteuertem Motor überwacht. Bei einem Fehler in der +5V Spannungsversorgung spricht die Diagnosefunktion ebenfalls an, so dass beide DTCs abgelegt werden. Zu Gunsten der Übersichtlichkeit des Beispiels wurde sowohl auf Stecker als auch auf die Spannungsversorgung des Systems verzichtet.

Das Verfahren zur Modellierung bedingter Abhängigkeiten in einer logischen Struktur soll verwendet werden, um den Stromlaufplan aus Abbildung 4.6 in ein Bayes-Netz zu überführen. Folgende Schritte sind dafür notwendig:

1. Wirkkettenknoten für jeden Anschluss am Steuergerät erzeugen (WK1, ..., WK4)
2. Symptomknoten für jeden DTC erzeugen und mit Wirkkettenknoten verbinden (OR-Verknüpfung)
 - DTC A (Überwachung der Sensorversorgungsspannung) := WK1
 - DTC B (Überwachung der Umluftklappe) := WK1 \vee WK2 \vee WK3 \vee WK4
3. Komponenten-knoten für alle Bauteile erzeugen und mit den Wirkkettenknoten verbinden (OR-Verknüpfung)
 - WK1 := Steuergerät \vee Leitung 1 \vee Splice \vee Luftklappe
 - WK2 := Steuergerät \vee Leitung 4 \vee Luftklappe \vee Splice \vee Leitung 1
 - WK3 := Steuergerät \vee Leitung 3 \vee Luftklappe \vee Leitung 2
 - WK4 := Steuergerät \vee Leitung 2 \vee Luftklappe \vee Leitung 3

Das Ergebnis ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

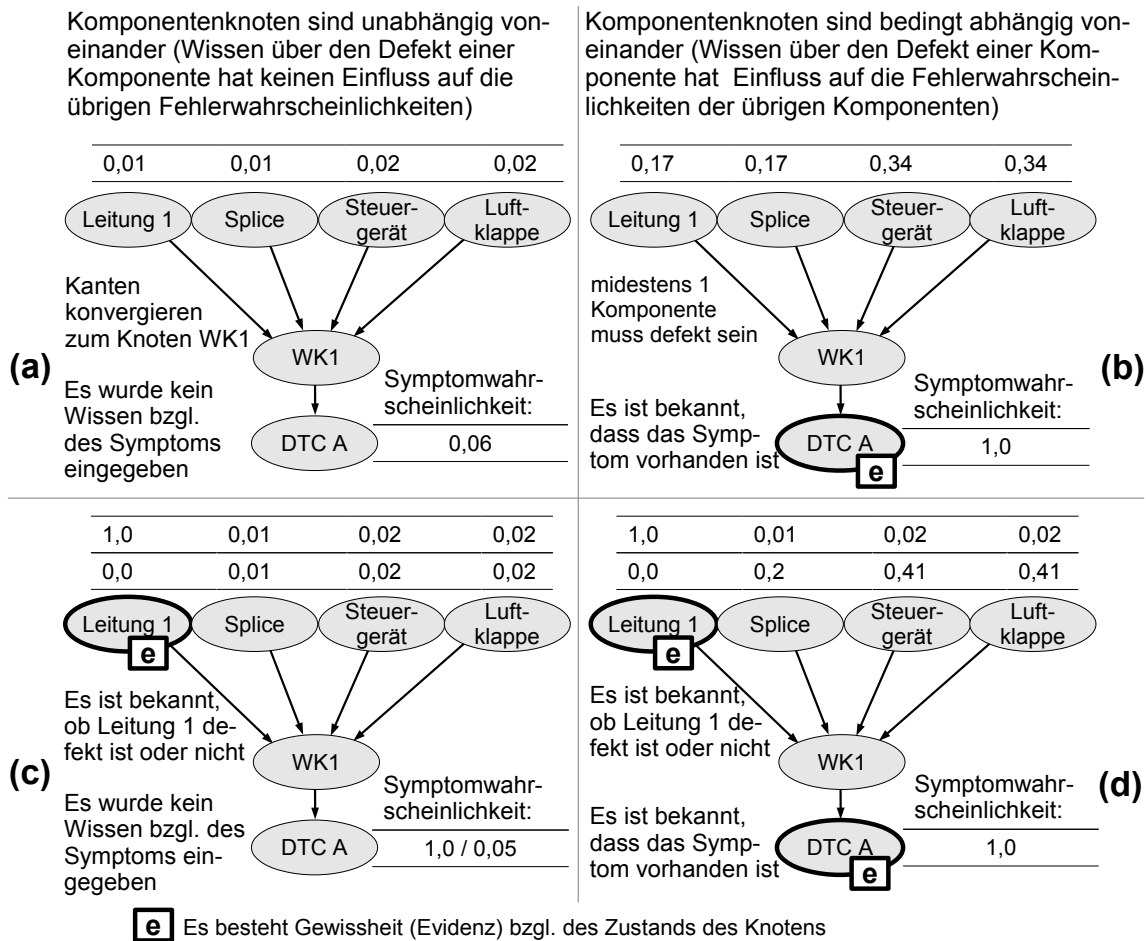


Abbildung 4.8.: Ausschnitt aus Abbildung 4.7 zur Verdeutlichung der bedingten Abhängigkeiten

4.3.2 Analyse des Netzes

Bei der Analyse des Bayes-Netzes aus Abbildung 4.7 ist zu erkennen, dass die Kanten von den Komponentenknoten zu den Wirkketten konvergieren⁸. Es gibt keine direkten, jedoch bedingte Abhängigkeiten zwischen den Komponentenknoten. In der Abbildung 4.8 wird dies an einem Ausschnitt aus Abbildung 4.7 gezeigt. 4.8.a zeigt den Ausschnitt einschließlich exemplarischer A-Priori-Ausfallwahrscheinlichkeiten (oberhalb der Komponentenknoten). Abbildung 4.8.b zeigt die Verteilung der Fehlerwahrscheinlichkeiten, wenn das Symptom (DTC A) vorhanden ist. Die Summe der Wahrscheinlichkeiten ist größer 1,0, da der gleichzeitige Ausfall mehrerer Komponenten (vgl. Verbundwahrscheinlichkeit) berücksichtigt wird. Wäre das Symptom definitiv nicht vorhanden (System funktioniert), würde die berechnete Fehlerwahrscheinlichkeit aller Komponenten 0,0 betragen.

4.8.c zeigt, dass solange kein Wissen über das Vorhandensein des Symptoms vorliegt, das Wissen über den Fehlerzustand von Leitung 1 keinen Einfluss auf die Fehlerwahrscheinlichkeiten der übrigen Komponenten hat. Lediglich die Wahrscheinlichkeit des Symptomknotens ändert sich. Sobald das Symptom jedoch vorliegt (Abbildung 4.8.d), beeinflusst Leitung 1 die Wahrscheinlichkeiten der übrigen Komponenten. Ist die Leitung 1 defekt ($P_{nio} = 1,0$), fällt die Fehlerwahrscheinlichkeit der übrigen Komponenten auf den A-Priori-Wert zurück. Wenn die Komponente intakt ist, erhöht sich die Fehlerwahrscheinlichkeit der übrigen Komponenten auf zusammen $> 1,0$ unter Beibehaltung der statistischen Verteilung.

Untersucht man die Struktur des Netzes bezüglich der Symptomknoten, so stellt man fest, dass die Knoten mit gemeinsamen Eltern voneinander abhängig sind. Hier liegen, ausgehend von den

⁸vgl. Abbildung 2.4 auf Seite 22

Wirkkettenknoten, divergierend gerichtete Kanten vor. Wenn bzgl. aller Symptome Gewissheit besteht, ist dies irrelevant, da die Abhängigkeiten in diesem Fall keine Auswirkungen zeigen. Bei Symptomknoten, deren Zustand nicht bekannt ist (z.B. Kundenwahrnehmungen, die das System bisher nicht abgefragt hat), sind diese Abhängigkeiten durchaus sinnvoll. Es kann dadurch ermittelt werden, welche Werte überhaupt abgefragt werden müssen. Wenn von mehreren Symptomen eindeutig auf den Zustand einer Wirkkette geschlossen werden kann, müssen die Symptome zwangsläufig den gleichen Wert haben. Diese Symptome brauchen deshalb nicht abgefragt werden.

Da die Komponentenknoten abhängig vom Zustand der Wirkkettenknoten sind, kann die Netzstruktur bezüglich der Wirkkettenknoten analysiert werden. Zwischen Wirkkettenknoten und Symptomknoten liegen konvergierend gerichtete Kanten (ausgehend von den Wirkkettenknoten). Somit sind die Wirkkettenknoten bei instantiiertem Symptomknoten bedingt abhängig. Bezogen auf das Beispiel aus Abbildung 4.7 bedeutet das, wenn DTC B bekannt ist, hat das Wissen über den Zustand der Wirkkette 2 Einfluss auf das Vertrauen in die Zustände der anderen Wirkketten. Dies ist ein gewolltes Verhalten. Es führt dazu, dass, sobald die Komponenten einer belasteten Wirkkette überprüft wurden und kein Fehler festgestellt wurde, bei weiterhin anliegendem Fehlersymptom die Komponenten der anderen Wirkketten stärker belastet werden. Weiterhin entlastet eine als fehlerhaft erkannte Komponente (vgl. Abbildung 4.8.d) alle weiteren bedingt abhängigen Komponenten auch aus anderen bedingt abhängigen Wirkketten.

4.3.3 Befüllen der Wahrscheinlichkeitstabellen

Die Komponentenknoten im Bayes-Netz besitzen keine Elternknoten. Dadurch werden in die Wahrscheinlichkeitstabellen dieser Knoten keine bedingten Wahrscheinlichkeiten, sondern lediglich A-priori-Wahrscheinlichkeiten eingetragen. Komponentenknoten haben die beiden sich gegenseitig ausschließenden Zustände „i.O.“ und „n.i.O.“ Da die Summe der beiden Wahrscheinlichkeiten 1,0 ergeben muss, kann die Wahrscheinlichkeit für den Zustand „i.O.“ aus der Wahrscheinlichkeit des Zustands „n.i.O.“ berechnet werden. Diese entspricht der Ausfallwahrscheinlichkeit der Komponenten.

Die Quelle der Ausfallwahrscheinlichkeiten einzelner Komponenten können entweder Herstellerangaben sein oder die Daten werden durch statistische Auswertungen von Reparaturfällen gewonnen. Besonders geeignet dafür sind Abrechnungsdaten von Fahrzeugen im Gewährleistungszeitraum. Da die Kosten für notwendige Reparaturmaßnahmen in dieser Zeit vom Hersteller getragen werden, liegen ihm Abrechnungen über notwendige Ersatzteile und durchgeführte Arbeitsschritte vor. Bei der Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeiten auf Grund von Abrechnungsdaten gibt es ein paar Besonderheiten zu beachten. Fehler, die erst bei älteren Fahrzeugen auftreten, werden in dieser Statistik nicht berücksichtigt. Dafür müssen Daten aus anderen Quellen herangezogen werden. Gelegentlich kommt es vor, dass Bauteile ersetzt und abgerechnet werden, die nicht defekt waren. Damit dies nicht die Statistik verfälscht, wird i.d.R. eine Falschtauschrate aus Stichproben ermittelt, die zur statistischen Bereinigung herangezogen werden kann. Ein weiteres Problem ist, dass sich auf diesem Weg zwar Ausfallwahrscheinlichkeiten für Steuergeräte und komplexe elektrische Bauteile ermitteln lassen, jedoch lassen sich die einzelnen Leitungen und Steckverbinder nicht auseinanderhalten. Deshalb werden solche Komponenten in Klassen mit gleicher Ausfallwahrscheinlichkeit eingeteilt.

Im Anhang A.1.5 auf Seite 146 wird gezeigt, dass das vorgestellte Diagnosesystem auch bei ungenauen und verrauschten Daten noch sehr gute Ergebnisse liefert. Aus diesem Grund ist eine aufwendige Nachbearbeitung und statistische Bereinigung in den meisten Fällen nicht notwendig.

Komponenten, die wie beschrieben zu einer Klasse zusammengefasst sind, haben die gleiche A-Priori-Wahrscheinlichkeit. Dies hat zur Folge, dass mehrere Bauteile, die der gleichen Klasse angehören (z.B. zwei Leitungsabschnitte) und die mit den gleichen Wirkkettenknoten verbunden

sind, in der Fehlerkandidatenliste gleich stark gewichtet sind und die Reihenfolge somit zufällig ist.

4.4 Optimierung des Netzes

Ein Netz, wie es in Abbildung 4.7 dargestellt ist, lässt sich automatisch aus den vorhandenen Daten generieren. Ein Netz dieser Art lässt sich jedoch, für ein komplexes System wie einem Fahrzeug, in den meisten Fällen nicht berechnen. Ein modernes Fahrzeug besteht aus deutlich über tausend elektrischen Bauteilen. Es kann mit Hilfe der On-Board-Diagnose mehrere Hundert Fehler erkennen. Dadurch ergeben sich sehr umfangreiche Netze, die auf Grund der beschriebenen Struktur noch dazu schwer berechenbar sind. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem das bisher beschriebene Netz so umgestellt werden kann, dass es ohne funktionale Einschränkungen auf einer für Werkstätten üblichen Rechnerhardware innerhalb weniger Sekunden berechnet werden kann. Der Nachweis dafür wird im Anhang A.1.7 ab Seite 149 erbracht.

4.4.1 Optimierungspotenzial

Bayes-Netze sind immer dann besonders schwer zu berechnen, wenn es Knoten mit vielen Elternknoten gibt. Dies ist vor allem bei den Wirkkettenknoten der Fall. Die Größe der Tabelle der bedingten Wahrscheinlichkeiten (engl. CPT Size) eines Knotens X ist abhängig von der Anzahl seiner Elternknoten und wird im Folgenden mit $CS(X)$ bezeichnet. $CS(X)$ kann, wenn alle Elternknoten gleich viele Zustände haben, mit Formel 4.1 berechnet werden. $n_{state}(X)$ gibt die Anzahl der möglichen Zustände des Knotens X an. $n_{state}(E(X))$ entspricht der Menge der Zustände jedes einzelnen Elternknotens und n_{Eltern} entspricht der Anzahl der Elternknoten. Da n_{Eltern} im Exponenten steht, ist diese Größe maßgeblich für den Speicherbedarf. Die Speicherkomplexität eines Knotens beträgt $O(2^n)$, wenn alle Elternknotennoten zwei Zustände haben. Wird die CPT Size aller Knoten eines Bayes-Netzes addiert, spricht man von der „Total CPT size“ (TCS) eines Bayes-Netzes ([Jen01]). Sie ist ein Maß für den Speicherbedarf, den ein Netz zur Berechnung benötigt.

$$CS(X) = n_{state}(X) \cdot n_{state}(E(X))^{n_{Eltern}} \quad (4.1)$$

In der Praxis kommen Wirkketten mit weit über 50 Komponenten vor. In einem Bayes-Netz gemäß Abbildung 4.7 würde die Repräsentation der betreffende Wirkkettenknoten gemäß der Formel (4.1) nicht in den Speicher eines heutigen Computers passen⁹. Bayes-Netze, in denen jeder Knoten über maximal drei Elternknoten verfügt, können mehrere Tausend Knoten umfassen und sind dennoch sehr schnell berechenbar. Es ist also sinnvoll, das Netz um zusätzliche Knoten zu erweitern, wenn dadurch die Anzahl der Eltern pro Knoten verringert wird. Das Verhalten des Netzes darf sich durch diesen Schritt natürlich nicht verändern.

4.4.2 Einfügen zusätzlicher Knoten

Da die Fehlerwahrscheinlichkeiten der einzelnen elektrischen Komponenten statistisch unabhängig sind, ist es möglich, weitere Knoten in das Netz einzufügen und dadurch Komponentenknoten zusammenzufassen. Dieses Vorgehen wird in [Jen01] als divorcing (Trennung) bezeichnet. Die Abbildung 4.9 zeigt ein Netz, bei dem der Knoten B, der zuerst 4 Elternknoten hatte, nach dem Einfügen der Knoten C1 und C2 nur noch 2 Elternknoten hat. Durch diesen Schritt verringert sich die TCS von 32 auf 24 (unter der Voraussetzung, dass jeder Knoten 2 Zustände hat).

Der Zwischenknoten C1 akkumuliert die Wahrscheinlichkeiten der Knoten A1 und A2. Aus Sicht des Knotens B stellen A1 und A2 dadurch eine Einheit dar und gehen lediglich mit

⁹Eine Wirkkette mit 50 Komponentenknoten würde 162777216GB RAM zur Berechnung benötigen

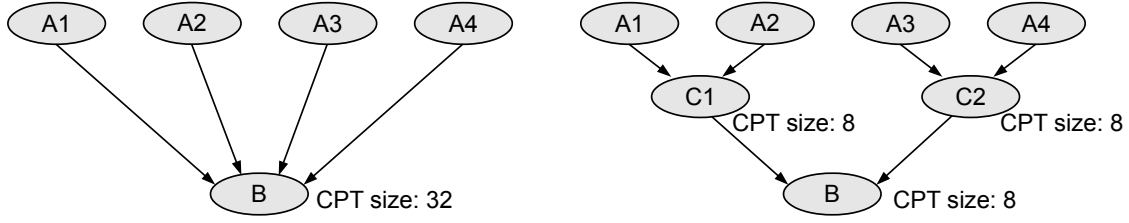


Abbildung 4.9.: Reduzierung der TCS von 32 auf 24 durch Einfügen von Knoten

einer gemeinsamen bedingten Wahrscheinlichkeit in den Zustand des Knotens B ein. Das auf diesem Wege optimierte Netz lässt sich dadurch nur dann verwenden, wenn keine Abhängigkeiten zwischen den Knoten A1 bis A4 bestehen. Diese Voraussetzung ist bei der wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung erfüllt. Die Knoten C1 und C2 werden nicht instantiiert. Wenn jedoch der Knoten B instantiiert wird, sind die Knoten A1 bis A4 auch nach dem Einfügen der Knoten bedingt abhängig voneinander. Somit lassen sich in einem Netz, wie es im Abschnitt 4.3 beschrieben ist, Knoten einfügen, ohne dass sich das Verhalten des Netzes verändert.

Das Ziel der Optimierung ist es, das Netz durch geschicktes Einfügen von Knoten so zu verändern, dass die TCS des Netzes minimiert wird. Die Formel (4.2) gibt an, wie viele Knoten (n_{Knoten}) mit je zwei Eltern notwendig sind, um $n_{Blätter}$ Knoten zusammenzufassen.

$$n_{Knoten} = n_{Blätter} - 1 \quad (4.2)$$

Mit Hilfe der Formel (4.3) kann allgemein berechnet werden, wie viele Knoten das Netz enthalten muss, wenn jeder Knoten n_{Eltern} Elternknoten hat. Das Ergebnis muss jeweils auf einen ganzzahligen Wert aufgerundet werden. Wenn $n_{Blätter}$ nicht ganzzahlig durch n_{Eltern} dividiert werden kann, hat ein Knoten weniger als n_{Eltern} Elternknoten.

$$n_{Knoten}(n_{Eltern}) = \frac{n_{Blätter} - 1}{n_{Eltern} - 1} \quad (4.3)$$

Aus den Formeln (4.3) und (4.1) lässt sich der Zusammenhang zwischen der akkumulierten CPT Size aller notwendigen Knoten ($CS(X)$) und der Anzahl der Elternknoten jedes Einzelnen berechnen. Entsprechend des hier beschriebenen Anwendungsfalls, bei dem jeder Knoten genau zwei Zustände besitzt ($n_{state}(X) = n_{state}(E(X))^{n_{Eltern}} = 2$), stellt die Formel (4.4) den beschriebenen Zusammenhang dar. Abbildung 4.10 zeigt, dass die Funktion unter der Annahme $n_{Eltern} > 1$ ein Minimum bei 2,44 besitzt.

$$TCS(n_{Eltern}) = \frac{n_{Blätter} - 1}{n_{Eltern} - 1} \cdot 2 \cdot 2^{n_{Eltern}} \quad (4.4)$$

Da die maximale Anzahl der Elternknoten ein positiver ganzzahliger Wert sein muss, kommen lediglich 2 und 3 in Frage. Wenn drei statt zwei Elternknoten verwendet werden, verdoppelt sich die Größe jeder CPT, dafür halbiert sich jedoch die Anzahl der notwendigen Knoten, so dass die TCS und somit der Speicherbedarf des Netzes in beiden Fällen gleich groß ist. Werte größer als drei wirken sich negativ auf den Speicherbedarf des Netzes aus. Im Anhang A.1.6 (S. 148) wird der Einfluss der maximalen Anzahl von Elternknoten auf den Speicherbedarf eines realen Netzes untersucht.

4.4.3 Logisches Zusammenfassen

Im Folgenden wird ein Algorithmus beschrieben, der ein gegebenes Bayes-Netz durch Einfügen zusätzlicher Knoten vereinfacht. Die Abbildung 4.11 zeigt einen Ausschnitt aus einem Netz, anhand dessen der Algorithmus beschrieben wird.

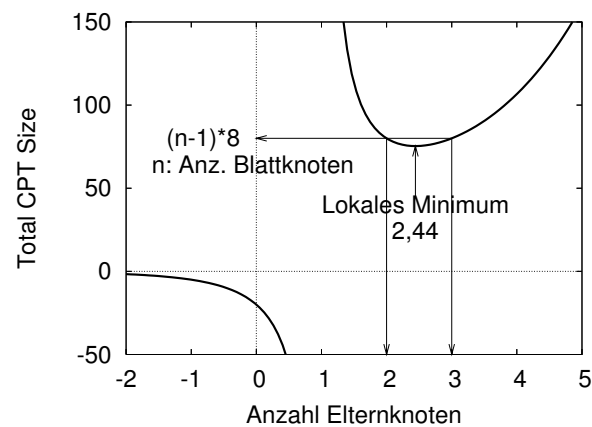


Abbildung 4.10.: Einfluss der Anzahl der Elternknoten auf die TCS nach Formel (4.4) mit $n = 11$

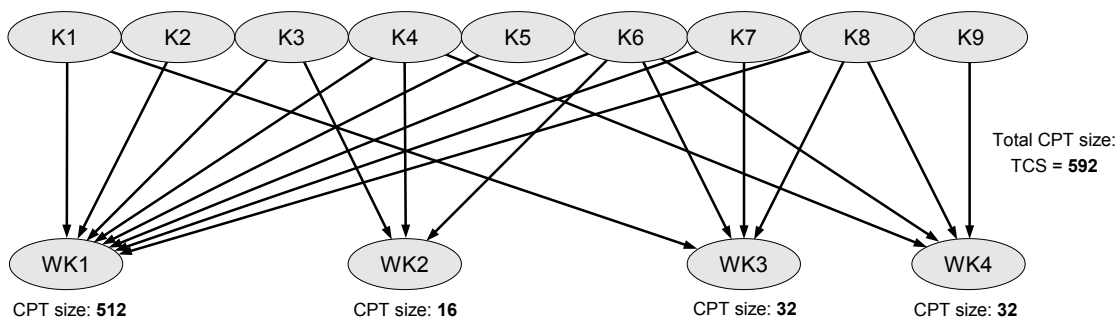


Abbildung 4.11.: Bayes-Netz zur Verdeutlichung des Optimierungspotenzials

Die in das Netz einzufügenden Knoten haben die Aufgabe, Bauteile, die physikalisch eine Einheit bilden, zu Teilsystemen zusammenzufassen, damit das Bayes-Netz von den verdächtigen Wirkketten zunächst auf ein solches Teilsystem und erst im Anschluss auf die eigentlichen Fehlerkandidaten schließen kann. Komponenten, die zusammen eine physikalische Einheit bilden, sind z. B. eine Verbindungsleitung mit den dazugehörigen Steckern oder ein Sensor einschließlich Zuleitung und Stromversorgung. Hängt ein solches Teilsystem in einem Netz mit mehreren Wirkketten zusammen, wird jede einzelne Teilkomponente mit allen beteiligten Wirkketten verbunden. Dies ist z. B. bei den Komponentenknoten K6 und K8 in Abbildung 4.11 der Fall. Beide Knoten sind mit den Wirkkettenknoten WK1, WK3 und WK4 verbunden. Dies sorgt in Konsequenz dafür, dass einzelne Wirkkettenknoten viele Eltern haben und das Netz dadurch aufwendiger zu berechnen ist. Sinnvoller wäre es, dieses Teilsystem durch einen neu eingefügten Knoten zusammenzufassen und dann diesen mit den Wirkkettenknoten zu verbinden.

Es wird also ein Verfahren gesucht, um Komponenten, die in mehreren Wirkketten vorkommen, zu identifizieren und zusammenzufassen. Um eine optimale Netzstruktur zu erreichen, ist es sinnvoll, jeweils die zwei oder drei Knoten zusammenzufassen, die gemeinsame Elternknoten für möglichst viele Wirkkettenknoten sind. Da diese Knoten auf Grund des logischen Zusammenfassens entstehen, werden sie im Folgenden als Logikknoten bezeichnet und stellen neben den Komponentenknoten, den Symptomknoten und den Wirkkettenknoten die vierte Art von Knoten im automatisch generierten Bayes-Netz dar.

Die Tabelle 4.3 stellt die Abhängigkeiten aus Abbildung 4.11 in einer anderen Form dar. Die Spalten sind die Komponenten 1 bis 9, die Zeilen sind die Wirkketten. Ein Kreuz gibt an, dass eine Kante zwischen den Komponenten und Wirkketten besteht. Es ist das Ziel, die

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
WK1	×	×	×	×	×	×	×	×	
WK2			×	×		×			
WK3	×					×	×	×	
WK4				×		×		×	×

Tabelle 4.3.: Tabellarische Darstellung der Abhängigkeiten

K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	
	1	1	1	1	2	2	2	0	K1
		1	1	1	1	1	1	0	K2
			2	1	2	1	1	0	K3
				1	3	1	2	1	K4
					1	1	1	0	K5
						2	3	1	K6
							2	0	K7
								1	K8
									K9

Tabelle 4.4.: Matrix der gefundenen Paare

Komponenten zu finden, die paarweise in möglichst vielen Wirkketten vorkommen. Dafür wird für alle Kombinationen von Komponenten die Anzahl der gemeinsamen Wirkketten ermittelt.

Die Ergebnisse werden in eine Matrix eingetragen, wie sie in Tabelle 4.4 dargestellt ist. Die Komponenten K1 und K2 haben eine gemeinsame Wirkkette (WK1). Deshalb wird am Schnittpunkt von K1 und K2 eine 1 eingetragen. Die Komponenten K4 und K6 haben drei gemeinsame Wirkketten, weshalb dort eine 3 eingetragen wird und so weiter. Die Diagonale sowie die untere linke Hälfte der Matrix wird nicht gefüllt. Beim Erstellen der Matrix wird abgespeichert, welche die größte vorkommende Zahl ist. Im Beispiel ist es die 3.

Beim Einfügen eines Logikknotens wird in die Tabelle 4.3 sowohl eine Zeile als auch eine Spalte eingefügt und mit dem gleichen Namen (z. B. LK1 für Logikknoten 1) beschriftet (vgl. Tabelle 4.5). Im Anschluss wird in der Matrix (Tabelle 4.4) ein Komponentenpaar mit der höchsten Anzahl gemeinsamer Wirkketten (im Beispiel drei) gesucht. Es gibt zwei Paare mit drei gemeinsamen Wirkketten. Es wird willkürlich das erste gefundene Paar (im Beispiel {K6, K8}) verwendet. Die beiden Komponenten werden in der Abhängigkeitstabelle durch ein Kreuz in der Zeile LK1 mit dem neuen Logikknoten verbunden. Zusätzlich werden die Verbindung zu den Wirkkettenknoten WK1, WK3 und WK4 in der jeweiligen Zeile entfernt. Stattdessen sind die drei Wirkkettenknoten mit dem Logikknoten LK1 in der gleichnamigen Spalte zu verbinden. Tabelle 4.5 zeigt die veränderte Abhängigkeitstabelle.

Nachdem das Komponentenpaar {K6, K8} abgearbeitet ist, werden die beiden Spalten K6 und K8 in der Matrix 4.4 markiert (nicht dargestellt). Anschließend wird nach dem nächsten Vorkommen der Drei in der Matrix gesucht, wobei jedoch die markierten Spalten bei der Suche

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	LK1
WK1	×	×	×	×	×		×		×	×
WK2			×	×		×				
WK3	×						×			×
WK4				×					×	×
LK1						×		×		

Tabelle 4.5.: Abhängigkeiten nach dem Hinzufügen eines Logikknotens

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	LK1	LK2	LK3
WK1		×	×		×						×	×
WK2			×	×		×						
WK3										×		×
WK4									×		×	
LK1						×		×				
LK2				×						×		
LK3	×						×					

Tabelle 4.6.: Abhängigkeiten nach dem Hinzufügen aller Logikknoten

K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	LK1	LK2	LK3	
	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	K1
		1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	K2
			1	1	1	0	0	0	0	1	1	K3
				0	1	0	0	0	1	0	0	K4
					0	0	0	0	0	1	1	K5
						0	1	0	0	0	0	K6
							0	0	0	0	0	K7
								0	0	0	0	K8
									0	1	0	K9
										0	1	LK1
											1	LK2
												LK3

Tabelle 4.7.: Matrix der Ursachenpaare nach Hinzufügen aller Logikknoten

ausgelassen werden. Da es kein weiteres Paar mit drei Wirkketten gibt, wird als Nächstes die Matrix aktualisiert. Dafür wird ihr zunächst eine Zeile und eine Spalte mit der Beschriftung LK1 hinzugefügt. Anschließend werden nach dem bekannten Verfahren die Zahlen der gemeinsamen Wirkketten aus der Tabelle 4.5 in die Matrix übertragen. Jetzt gibt es bereits kein Komponentenpaar mehr, das in drei Wirkketten vorkommt. Als Nächstes wird der Logikknoten 2 hinzugefügt, der den Komponentenknoten 4 mit den Logikknoten 1 verbindet und Logikknoten 3, der Komponentenknoten 1 und Komponentenknoten 7 verbindet.

Die Tabelle 4.6 stellt die Abhängigkeiten nach diesem Schritt dar. Wenn die Matrix erneut aktualisiert wird (Tabelle 4.7), ist zu erkennen, dass es kein Knotenpaar mehr gibt, das mit mehr als einem Wirkkettenknoten verbunden ist. Die Abbildung 4.12 zeigt das Netz nach dem logischen Zusammenfassen. Es ist zu erkennen, dass dieses Netz drei Knoten mehr enthält. Die Anzahl der Elternknoten ist dafür jedoch gesunken. Dadurch hat sich die TCS von 592 in Abbildung 4.11 auf 120 in Abbildung 4.12 verringert.

Bei genauerer Betrachtung der Abbildung 4.12 ist erkennbar, dass weiteres Optimierungspotenzial besteht. Der Wirkkettenknoten WK1 ist mit fünf Elternknoten immer noch zu groß. Bei dem vorgesehenen Anwendungsfall der automatischen Generierung des Netzes aus Strukturdaten kann es bei bestimmten elektrischen Konstellationen immer noch zu „entarteten“ Netzen kommen, die nicht berechnet werden können.

Im zweiten Optimierungsschritt werden deshalb weitere Knoten eingefügt. Dem Optimierungsalgorithmus wird die maximal zulässige Zahl von Elternknoten übergeben. Oberhalb jedes Knotens, der diesen Wert verletzt, wird ein zusätzlicher Knoten eingefügt, der die maximal zulässige Zahl von Knoten zusammenfasst. Diese Knoten werden im Folgenden als virtuelle Knoten (VK) bezeichnet. Die Optimierung endet, wenn alle Knoten den Maximalwert einhalten. Die Abbildung 4.13 zeigt das Netz mit einem zusätzlichen Knoten VK1, durch den die maximale Zahl der

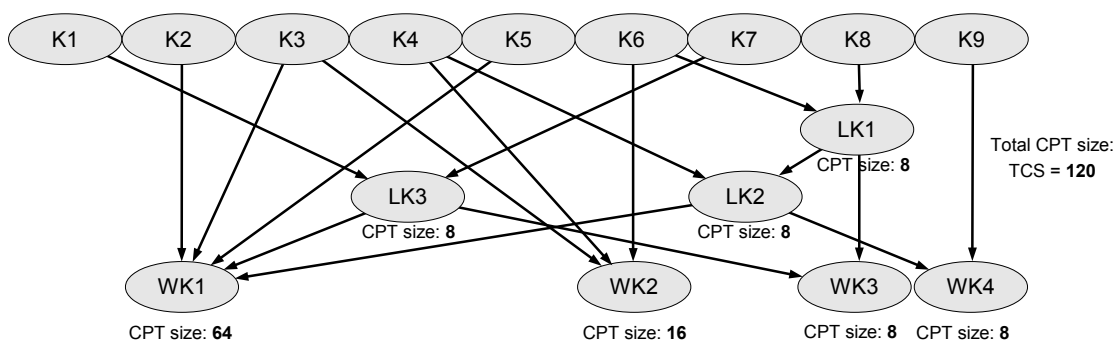


Abbildung 4.12.: Bayes-Netz nach dem logischen Zusammenfassen

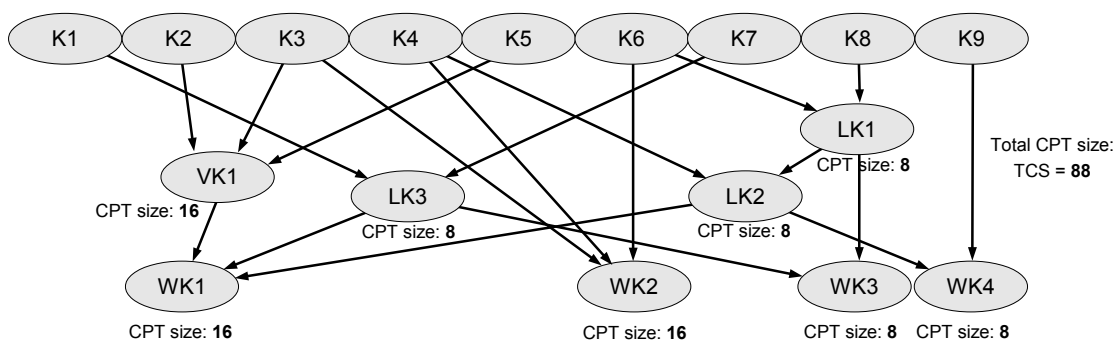


Abbildung 4.13.: Optimiertes Netz – max. Elternzahl: 3

Elternknoten auf drei begrenzt wird. In Abbildung 4.14 wird das Netz so erweitert, dass jeder Knoten nur noch zwei Eltern hat. Wie in der Abbildung 4.10 dargestellt, führt eine maximale Elternzahl von zwei und von drei zur gleichen TCS. In diesen beiden Fällen ist sie gegenüber Abbildung 4.12 von 120 auf 88 gesunken.

4.5 Ermittlung der Ursache von Fehlerschauern

Es gibt Fehlersituationen in einem Fahrzeug, in denen mehrere unterschiedliche Fehlersymptome vorhanden sind. Im Bayes-Netz des Diagnosesystems werden in diesem Fall mehrere Wirkketten belastet. Das Belasten einer Wirkkette bedeutet, dass durch die Fehlersymptome die Wahrscheinlichkeit des Zustands „n.i.O.“ im Wirkkettenknoten erhöht wird. In Konsequenz daraus werden

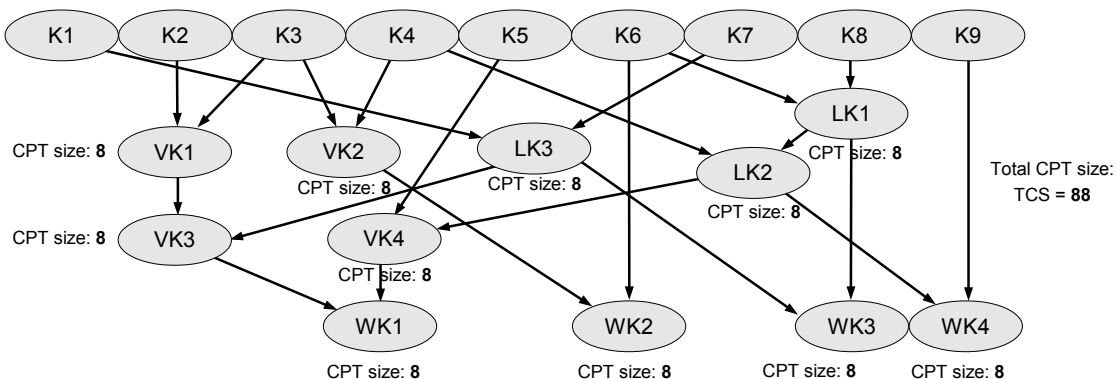


Abbildung 4.14.: Optimiertes Netz – max. Elternzahl: 2

auch die Knoten der Komponenten in den Wirkketten belastet, so dass diese als potentielle Fehlerkandidaten in die Fehlerkandidatenliste aufgenommen werden.

Wenn eine Komponente in mehreren belasteten Wirkketten auftaucht, wird sie stärker belastet als andere Komponenten. Dadurch können Fehlerursachen, die sich auf mehrere Systeme und somit auf unterschiedliche Fehlersymptome auswirken, besonders effizient gefunden werden. Ein Beispiel dafür ist z. B. eine gemeinsame Masseverbindung für verschiedene Sensoren. Wenn diese gestört ist, sollten die Diagnosefunktionen aller Sensoren einen Fehler erkennen. Dadurch kommt es zu einem Fehlerschauer, also zu einer Häufung von Ereignisspeichereinträgen. Da die betroffene Masseverbindung in allen Wirkketten enthalten ist, wird sie am stärksten von allen Fehlerkandidaten belastet und somit vom Diagnosesystem als wahrscheinlichste Ursache für den Fehler identifiziert. Wenn im genannten Beispiel jedoch nur an einem der Sensoren ein Fehler erkannt wird, sorgen die intakten (nicht belasteten) Wirkketten dafür, dass die gemeinsame Masseverbindung als Fehlerursache entlastet wird.

4.6 Clusterung der Kandidaten bei unabhängigen Fehlern

In der Praxis kann es vorkommen, dass in einem Fahrzeug mehrere Fehler vorliegen, die keine gemeinsame Ursache haben. Das Bayes-Netz belastet in diesem Fall genau wie bei einem Einzelfehler jeweils die zugehörigen Wirkketten und Komponenten. Wenn die ermittelten Fehlerkandidaten aller Fehler in einer gemeinsamen Liste ausgegeben werden, ist für den Anwender nicht ersichtlich, welcher Fehlerkandidat zu einem bestimmten Fehler gehört. Unter Umständen ist dadurch für den Anwender nicht mehr nachvollziehbar, wie das Diagnosesystem zu diesen Fehlerkandidaten gekommen ist. Vielfach möchte der Anwender jeweils nur einen der Fehler abstellen, so dass die übrigen Kandidaten zunächst irrelevant sind.

Die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung wurde deshalb durch eine Funktion zur Clusterung der Fehlerkandidaten erweitert. Dadurch werden (sobald mehrere Fehler vorliegen) nicht eine große Fehlerkandidatenliste sondern mehrere kleine Listen ausgegeben. Ein Cluster ist jeweils einem Fehlersymptom zugeordnet.

Bei der Clusterung der Fehlerkandidaten wird zunächst für jedes vorliegende Fehlersymptom ein leerer Cluster angelegt und mit dem Namen des entsprechenden Symptoms versehen. Die Systemstruktur aus Abschnitt 4.2.1 beschreibt den Zusammenhang zwischen Fehlersymptomen, Wirkketten und Komponenten. Mit Hilfe dieser Struktur wird für jedes vorliegende Fehlersymptom bestimmt, welche der ermittelten Fehlerkandidaten mit ihm in Beziehung stehen. Die entsprechenden Fehlerkandidaten werden dann in den dazugehörigen Cluster einsortiert und ausgegeben. Innerhalb eines Clusters sind die Fehlerkandidaten weiterhin gemäß ihrer Fehlerwahrscheinlichkeit sortiert.

Auf Grund der gemeinsamen Wirkketten und der vorhandenen Symptome sind alle Fehlerkandidaten innerhalb eines Clusters bedingt abhängig voneinander¹⁰. Das bedeutet, dass sich das Ergebnis einer Überprüfung eines Fehlerkandidaten auf Fehlerwahrscheinlichkeit aller Fehlerkandidaten im gleichen Cluster auswirkt. Wenn sich die Wahrscheinlichkeit eines Fehlerkandidaten oder Symptoms aus einem anderen, unabhängigen Cluster ändert, hat dies keinen Einfluss.

Wenn von mehreren Fehlersymptomen auf einen gemeinsamen Fehlerkandidaten geschlossen werden kann, so erscheint dieser in allen betroffenen Clustern. Die Cluster besitzen dadurch eine Abhängigkeit untereinander. Eine Änderung der Fehlerwahrscheinlichkeit eines gemeinsamen Kandidaten hat Auswirkungen auf die Wahrscheinlichkeitsverteilungen innerhalb aller abhängigen Cluster. Im Kapitel 6 wird die Clusterung weiter behandelt.

¹⁰Dieses Verhalten wurde bereits in Abbildung 4.8.d verdeutlicht

4.7 Einsatz im Diagnosesystem

Die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung wurde im Rahmen dieser Arbeit als Softwaremodul für ein modulares Diagnosesystem (FiDis vgl. Abschnitt 7.2 Seite 102) implementiert. Die Generierung des Bayes-Netzes erfolgt unmittelbar vor dessen Anwendung automatisch aus den zur Verfügung stehenden Daten. Die Berechnung der Bayes-Netze erfolgt mit Hilfe der Software HUGIN¹¹, einem kommerziellen Werkzeug, das eine leistungsfähige Schnittstelle (API) zur Verfügung stellt. Das beschriebene Softwaremodul verwendet diese Schnittstelle, um die Bayes-Netze zu berechnen. Das modulare Diagnosesystem FiDis wurde speziell zur Erprobung der in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren entwickelt. Es bietet eine webbasierte Benutzerschnittstelle zur komfortablen Bedienung des Systems und verschiedene Module für den Zugriff auf die benötigten Daten. Um auf die im Fahrzeug hinterlegten DTCs zugreifen zu können, wurde eine Schnittstelle zum Diagnosesystem VAS5163, welches in der Entwicklung der Volkswagen AG eingesetzt wird, implementiert. Anhand der im Fahrzeug abgespeicherten Fahrgestellnummer wird automatisch der passende Datensatz mit der fahrzeugindividuellen Strukturbeschreibung geladen. Das zu verwendende Bayes-Netz wird jedes mal zu Beginn einer Diagnosesitzung neu generiert. Es wäre auch vorstellbar, dass die Generierung des Netzes für jedes Fahrzeug nur genau einmal durchgeführt wird und das generierte Netz zusammen mit den strukturbeschreibenden Daten dauerhaft in einer zentralen Datenbank hinterlegt wird. Da die Generierung und Optimierung des Bayes-Netzes nur ca. 3s¹² in Anspruch nimmt, wurde entschieden, diesen Schritt vor Beginn jeder Diagnosesitzung erneut durchzuführen.

4.7.1 Setzen der Fehlersymptome

Das Diagnosesystem FiDis bietet zwei Möglichkeiten zur Eingabe von Fehlersymptomen. Die aus einem Fahrzeug ausgelesenen Symptome (DTCs) können über eine XML-Datei, welche vom VAS5163 erzeugt wird, importiert werden. Die zweite Möglichkeit besteht in der manuellen Eingabe der Fehlersymptome durch den Anwender. Die Abbildung 4.15 zeigt den dazugehörigen Eingabedialog. Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit, die aus dem Fahrzeug ausgelesenen Informationen zu modifizieren.

In Abbildung 4.15 ist zu erkennen, dass für jedes Symptom einer von drei Zuständen gesetzt werden kann. Die Eingaben „Fehler vorhanden“ und „kein Fehler vorhanden“ setzen den Zustand des zum Symptom gehörenden Bayes-Netz-Knotens auf einen festen Zustand (harte Evidenz). Im Zustand „unbekannt“ wird im Symptom-Knoten keine Evidenz gesetzt. Bei der manuellen Eingabe von Symptomen hat der Mechaniker die Möglichkeit, den Zustand eines bestimmten Fehlersymptoms einzugeben oder den Zustand auf „unbekannt“ zu belassen. Normalerweise wird der Mechaniker nur bei den Symptomen eine Eingabe vornehmen, bei denen er annimmt, dass diese Information einen sinnvollen Einfluss auf die Fehlerkandidatenermittlung hat. In der Abbildung ist zu erkennen, dass zu jedem Fehlersymptom eine Wahrscheinlichkeit ausgegeben wird. Wenn der Fehler als vorhanden angegeben wird, beträgt diese 1,0 und bei nicht vorhanden 0,0. Wird keine Evidenz gesetzt, wird der vom Bayes-Netz berechnete Wert ausgegeben.

Anders verhält es sich bei den Fehlersymptomen, die aus dem Fahrzeug ausgelesen werden. Ein Ereignisspeichereintrag kann zwei Zustände haben. Er ist vorhanden oder er ist nicht vorhanden. Wenn die On-Board-Diagnose ein Symptom erkannt hat, erzeugt sie einen entsprechenden Eintrag. Wenn ein solcher Eintrag vorhanden ist und seitdem Auslesen keine Reparaturhandlung am entsprechenden System stattgefunden hat, kann davon ausgegangen werden, dass das Symptom weiterhin vorliegt. Für die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung wird deshalb der Zustand des Symptoms auf „Fehler vorhanden“ gesetzt.

Wenn ein Ereignisspeichereintrag nicht vorhanden ist, bedeutet dies nicht zwangsläufig, dass das System fehlerfrei ist. Dies hat zwei Gründe. Ein Teil der Diagnosefunktionen in einem Steuergerät

¹¹HUGIN ist u. a. in [Jen01] ausführlich beschrieben.

¹²vgl. Ergebnisse der Performance-Untersuchung Tabelle A.12 aus Seite 150

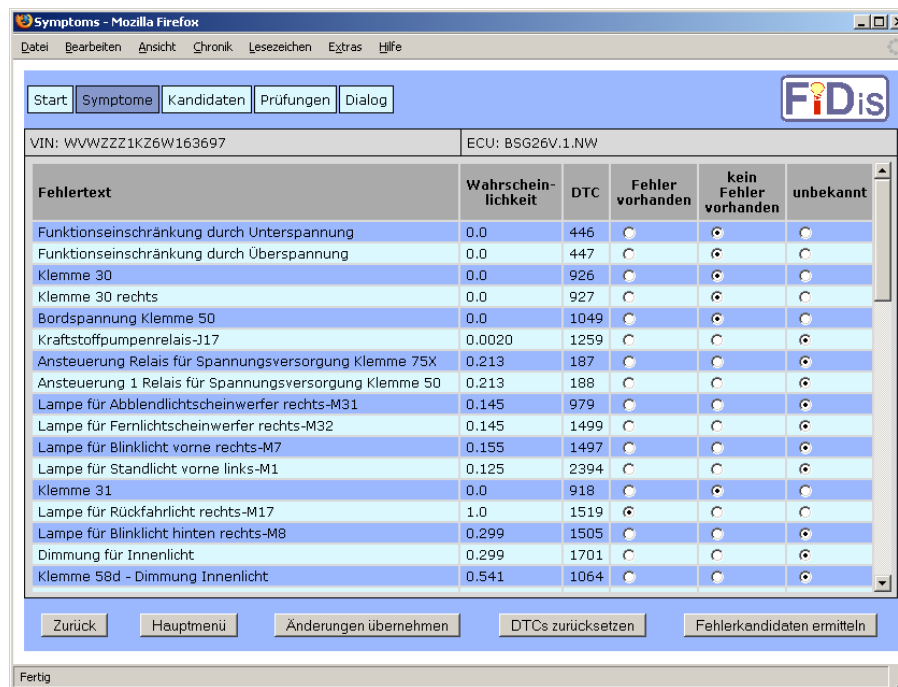


Abbildung 4.15.: Anzeige der vorhandenen Symptome mit Bearbeitungsmöglichkeit

werden zyklisch ausgeführt, während die übrigen nur unter bestimmten Voraussetzungen ausgeführt werden. Ein Temperatursensor, der z. B. alle 100ms abgefragt wird, kann auch im gleichen Rhythmus (z.B. durch Plausibilisierung der Werte) auf mögliche Fehler überprüft werden. Die Diagnose von Aktoren ist in den meisten Fällen nur möglich, während diese angesteuert werden. Dann werden z.B. der fließende Strom oder die Veränderung von Sensorsignalen des gleichen Systems überwacht. Das Ergebnis von Diagnosefunktionen, die nicht zyklisch, sondern nur unter bestimmten Voraussetzungen ausgeführt werden, sollte deshalb im fehlerfreien Fall nicht in Form einer harten Evidenz berücksichtigt werden.

Für jede Diagnosefunktion in einem Steuergerät sind Fehlerersatzbedingungen definiert. Diese geben an, welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit eine Fehlererkennung durchgeführt wird. In der elektronisch lesbaren Beschreibung der Diagnosefunktionen (Abschnitt 4.2.2) ist hinterlegt, ob eine Fehlererkennung ständig oder nur unter bestimmten Bedingungen durchgeführt wird.

4.7.2 Dynamische Fehlerkandidatenliste

Die dynamische Fehlerkandidatenliste ist ein Element der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Software. Die Aufgabe besteht in der Clusterung und Gewichtung der Fehlerkandidaten sowie in der Verarbeitung von Prüfergebnissen. Wenn durch eine Prüfung ein oder mehrere Komponenten als i. O. bzw. n. i. O. klassifiziert wurden, wird dies als Evidenz auf die Knoten im Bayes-Netz übertragen und eine Neuberechnung angestoßen. Dadurch verändern sich die Fehlerwahrscheinlichkeiten der Komponenten innerhalb der dynamischen Fehlerkandidatenliste.

Die Abbildung 4.16 zeigt die Benutzerschnittstelle der Fehlerkandidatenliste. Die einzelnen Fehlerkandidaten werden in jedem Cluster absteigend sortiert nach Fehlerwahrscheinlichkeit dargestellt. Im Laufe einer Diagnosesitzung wird durch die Eingrenzung der Fehlerursache die Menge der möglichen Fehlerkandidaten immer kleiner. Der Mechaniker kann jederzeit in diese Ansicht wechseln, um sich einen Überblick darüber zu verschaffen, welche Bauteile bereits geprüft bzw. noch zu prüfen sind.

Die Summe der Fehlerwahrscheinlichkeiten der dargestellten Fehlerkandidaten beträgt nicht zwangsläufig 1,0 da:

VIN: WWZZZ1KZ6W163697 Fehlerkandidaten

IFID	Fehlerkandidaten	Fehler Wahrsch.	n.i.O.	i.O.	???
Cluster 1: DTC 1497 Lampe für Blinklicht vorne rechts-M7 BSG26V.1.NW					
5934	Anschlussfassung_Halogenscheinwerfer_rechts (Top-Kandidat!)	0.712	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6645	GND_Scheinwerfer_re	0.163	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6162	STK_BordnetzSTG	0.111	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5935	STK_Scheinwerfer_RE	0.108	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
7051	Splice_im_Kabelstrang	0.065	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6993	Splice_im_Kabelstrang	0.065	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6647	Lasche_GND_Scheinwerfer_re	0.027	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6158	DRV_BordnetzSTG	0.022	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
8084	BTL-Leitung	0.015	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Cluster 2: DTC 1519 Lampe für Rückfahrlicht rechts-M17 BSG26V.1.NW					
6840	automatisch_abblendbarer_Innenspiegel	0.118	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6915	GND_AHK	0.052	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6841	STK_automatisch_abblendbarer_Innenspiegel	0.035	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
7461	BTL-Leitung	0.015	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
7490	BTL-Leitung	0.015	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Hauptmenü Prüfungen generieren

Abbildung 4.16.: Ausgabe der Fehlerkandidatenliste mit der Möglichkeit zur Eingabe von Befunden

1. die Liste nicht zwingend vollständig ist, sondern nur die 10 oder 15 wahrscheinlichsten Fehlerkandidaten ausgegeben werden,
2. mindestens ein Kandidat möglicherweise aber auch mehrere defekt sind, was zu einer Summenwahrscheinlichkeit > 1 führt.

Entlastung von Komponenten

Wenn eine Prüfung (z. B. eine Durchgangsprüfung) das Ergebnis i. O. liefert, bedeutet dies, dass alle enthaltenen Bauteile i. O. sind und somit deren Fehlerwahrscheinlichkeit 0,0 beträgt. Dieser Wert wird als harte Evidenz für den bzw. die betreffenden Komponentenknoten gesetzt und bei allen späteren Berechnungsschritten berücksichtigt.

In einem fehlerbehafteten System sind alle Komponentenknoten des Bayes-Netzes bedingt abhängig voneinander. Wird ein Teil der Komponenten mit i. O. klassifiziert, steigt dadurch die Fehlerwahrscheinlichkeit der übrigen Komponenten.

Belastung von Komponenten

Wenn eine Prüfung n. i. O. als Ergebnis liefert, bedeutet dies, dass mindestens eines der enthaltenen Bauteile defekt ist. Umfasst die Prüfung genau ein Bauteil, wird für dieses eine harte Evidenz von 1,0 gesetzt, da es allem Anschein nach defekt ist. Umfasst sie mehrere Bauteile, erfolgt eine anteilige Belastung in Form einer weichen Evidenz, d. h. ein Wert zwischen 0,0 und 1,0. Das Setzen einer weichen Evidenz bedeutet, dass für das betreffende Bauteil weiterhin eine Fehlerwahrscheinlichkeit berechnet wird. Die Berechnung berücksichtigt jedoch die Evidenz in der Form, dass eine hohe Evidenz zu einer verhältnismäßig hohen Fehlerwahrscheinlichkeit führt. Wenn eine der Komponente bereits zuvor geprüft wurde und eine harte Evidenz von 0,0 (Komponente i. O.) erhalten hat, bleibt die Fehlerwahrscheinlichkeit auch nach der anteiligen Belastung bei 0,0.

Wenn eine Reihenschaltung z.B. von 10 Komponenten als fehlerhaft erkannt wurde, besitzt sie insgesamt eine Fehlerwahrscheinlichkeit von 1,0. Unter der Annahme, dass nur eine Komponente defekt ist und alle die gleiche A-priori-Ausfallwahrscheinlichkeit besitzen, kann man für jede Komponente eine Fehlerwahrscheinlichkeit 0,1 annehmen. Ist die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Komponente beispielsweise doppelt so hoch wie die der übrigen, so muss auch dessen Fehlerwahrscheinlichkeit doppelt so hoch sein. Die Summe sollte in jedem Fall 1,0 ergeben. Genau dieses Verhalten realisiert ein Bayes-Netz, wenn eine weiche Evidenz gesetzt wird. Eine anteilige Belastung von 10 Komponenten einer Wirkkette bedeutet, dass für jede der Komponenten eine Evidenz von 0,1 gesetzt wird¹³. Nach einer Neuberechnung des Netzes erhöht sich dadurch die Fehlerwahrscheinlichkeit der entsprechenden Komponenten. Das Verhältnis der Wahrscheinlichkeiten untereinander ändert sich dadurch nicht.

4.8 Test der Fehlerkandidatenermittlung

In diesem Kapitel wird die Entwicklung eines Systems zur wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung beschrieben. Zu Beginn des Kapitels wurden entsprechende Anforderungen an das System definiert. In den darauf folgenden Abschnitten wurden Verfahren beschrieben, mit denen es möglich sein soll, alle an das System gestellten Anforderungen zu erfüllen. Nun soll überprüft werden, ob diese Verfahren tatsächlich geeignet sind, um das zugrunde liegende Problem (vgl. Abschnitt 3.1) und alle daraus resultierenden Anforderungen zu lösen. Zu diesem Zweck wurden alle in diesem Kapitel beschriebenen Verfahren in einer Software umgesetzt.

Softwaretests

Um nachzuweisen, dass eine Software funktionalen und qualitativen Anforderungen genügt, werden Softwaretests durchgeführt. Das Testen von Software ist keine triviale Aufgabe und ist abhängig von den zu testenden Anforderungen und nachzuweisenden Qualitätsmerkmalen mit hohem Aufwand verbunden. Die internationale Norm [ISO01] sowie die Standards [IEE90] und [IEE98] beschreiben den aktuellen Stand der Technik im Bezug auf Softwaretests.

In [SL05] wird im Bezug auf Softwaretests u.a. folgende Aussage getroffen: „Testen kann die Fehlerfreiheit nicht nachweisen. Um dies zu tun, müsste das Programm in allen möglichen Situationen, mit allen möglichen Eingaben und unter Berücksichtigung aller unterschiedlichen Randbedingungen getestet werden. Ein solcher vollständiger Test ist praktisch nicht durchführbar. [...] Tests sind immer nur Stichproben, und der Testaufwand ist deshalb nach Risiko und Prioritäten zu steuern.“ Aus diesen Aussagen ist zu entnehmen, dass vor einem Softwaretest das Testziel genau definiert werden muss.

Testziel für den Test der Fehlerkandidatenermittlung: Der Test der Fehlerkandidatenermittlung soll nachweisen, dass mit den entwickelten und in diesem Kapitel beschriebenen Verfahren eine Softwareimplementierung möglich ist, welche sämtliche Anforderungen aus Abschnitt 4.1 erfüllt. Es soll jedoch nicht nachgewiesen werden, dass die Implementierung den qualitativen Anforderungen genügt, um z.B. für den produktiven Einsatz in Werkstätten verwendet werden zu können.

Um nachzuweisen, dass eine bestimmte Funktionalität den Anforderungen entsprechend umgesetzt ist, reicht es in den meisten Fällen aus, das Verhalten der Funktion einmalig zu überprüfen. Dafür wird die Funktion unter vorgegebenen Randbedingungen mit definierten Eingangsgrößen ausgeführt und das Ergebnis bzw. die Reaktion des Systems mit den Erwartungen verglichen. Eine mehrfache Wiederholung des Tests würde bei gleichen Eingangsgrößen und Randbedingungen jeweils zum gleichen Ergebnis führen.

¹³unabhängig von der A-priori-Wahrscheinlichkeit und der zuvor berechneten Fehlerwahrscheinlichkeit

Prüfungen	Abdeckung der Anforderungen																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A.1.1 Grundfunktion	×	×			×					×		×			×	×		
A.1.2 komplexes Fehlerbild			×					×	×									
A.1.3 unabhängige Fehler				×								×		×				
A.1.4 Fehler in Strukturdaten						×	×											
A.1.5 Fehler in Felddaten											×							
A.1.6 Speicherbedarf																	×	×
A.1.7 Performance																	×	×

Tabelle 4.8.: Abdeckung der Anforderungen (Abschnitt 4.1) durch Prüfungen (Anhang A.1)

Durch einen einmaligen Test kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die zu testende Funktion unter Verwendung anderer Eingangsgrößen und Randbedingungen ein fehlerhaftes Verhalten aufweist. Dies kann u. a. folgende Gründe haben:

- Überlauf von Wertebereichen bei Berechnungen
- Division durch Null (Unstetigkeit der Funktion)
- Verzweigungen im Programmablauf (Fallunterscheidungen), die abhängig von Eingangsgrößen und Randbedingungen sind.

Um das Risiko zu minimieren, dass eine Stück Software, dessen Funktionalität anhand eines konkreten Testfalls nachgewiesen wurde, unter anderen Bedingungen ein fehlerhaftes Verhalten zeigt, sind zwei Verfahren üblich [SL05]:

1. Sehr viele Tests mit jeweils unterschiedlichen Eingangsgrößen und Randbedingungen
2. Nachweis einer vollständigen Testabdeckung durch Analyse der Softwareimplementierung und gezielte Auswahl der Eingangsgrößen bei den einzelnen Testdurchläufen

Das erste Verfahren wird z. B. bei Felderproben eingesetzt. Die Werkstatteprobung (Abschnitt 7.4) und die Erprobung mit Felddaten (Abschnitt 7.5) fällt in diese Kategorie. Das Ergebnis einer solchen Erprobung ist kein Nachweis für die Fehlerfreiheit der Software, es kann lediglich von einer gewissen Bewährtheit gesprochen werden. Der Nachweis der Korrektheit einer Software bedarf u. a. einer vollständigen Testabdeckung. Dieser Nachweis ist mit wesentlich höherem Aufwand verbunden und kann nur in besonderen Fällen erbracht werden.

Da es sich bei der hier zu testenden Software um eine prototypische Implementierung handelt, besteht auch kein Anspruch bzgl. Bewährtheit und Stabilität der Software. Um die grundlegende Funktionalität nachzuweisen, reicht ein einmaliger Test der Funktionalität gegen die Anforderungen.

Ausgehend von den Anforderungen aus Abschnitt 4.1 wurden sieben Testfälle (A.1.1 bis A.1.7) entwickelt, welche zusammen die 18 Anforderungen abdecken. Die Tabelle 4.8 stellt dar, welche Anforderungen durch die einzelnen Prüfungen (Abschnitt A.1.1 bis A.1.7) abgedeckt werden. Die entwickelten Testfälle bestehen immer aus den folgenden Elementen:

- **Zu untersuchende Eigenschaften:** Zuerst wird angegeben, was das Ziel der Untersuchung ist und welche Eigenschaften des Systems damit überprüft werden sollen.
- **Anforderungsabdeckung:** Im Abschnitt 4.1 wurden Anforderungen an das zu entwickelnde System definiert. Um mit den durchgeführten Tests eine vollständige Anforderungsabdeckung zu erreichen, müssen alle Anforderungen mindestens einmal überprüft werden.
- **Szenario:** Hier werden die Randbedingungen der Untersuchung beschrieben. Das betrifft vor allem die Eingangsdaten sowie die Konfiguration des Systems.
- **Beschreibung:** Dieser Abschnitt enthält detaillierte Informationen darüber, wie genau die Untersuchung abläuft.

- **Erwartung:** Hier werden die erwarteten Ergebnisse auf Grund des geforderten Verhaltens dargestellt.
- **Ergebnis:** In diesem Abschnitt wird das tatsächlich beobachtete Verhalten des Systems während der Untersuchung beschrieben.
- **Bewertung:** Im Abschnitt Bewertung wird eine Aussage darüber getroffen, ob die Ergebnisse der Untersuchung mit den Erwartungen übereinstimmen und damit die Anforderungen erfüllt sind. Die Bewertung kann entweder *Bestanden* oder *nicht Bestanden* lauten.

Da die Beschreibung der Testfälle sehr umfangreich ist, wurde sie im Anhang (ab Seite 139) abgedruckt. In diesem Abschnitt erfolgt lediglich eine kurze Zusammenfassung. Da die Anforderungsabdeckung bereits in Tabelle 4.8 dargestellt ist, wird bei den einzelnen Testfällen auf diese Angabe verzichtet.

Prüfung der Grundfunktionen

Die Prüfung der Grundfunktionen (Prüfung A.1.1 ab Seite 139) erfolgt mit Hilfe realer Fahrzeugdaten. Es werden strukturbeschreibende Daten eines Fahrzeugs mit elektrischen Sonderausstattungen verwendet. Der Testfall ist in drei Teilprüfungen unterteilt.

Teilprüfung 1 Dem Diagnosesystem wird ein Fehlersymptom in Form eines DTCs in einem der Steuergeräte mitgeteilt. In Reaktion darauf wird eine nach Fehlerwahrscheinlichkeiten gewichtete Liste mit Fehlerkandidaten generiert (Tabelle A.1 auf Seite 141). Die Elemente der Fehlerkandidatenliste sowie deren Fehlerwahrscheinlichkeit werden unter Berücksichtigung der strukturbeschreibenden Daten sowie der unterschiedlichen A-Priori-Wahrscheinlichkeiten bewertet.

Teilprüfung 2 Dem System wird mitgeteilt, dass zwei der ermittelten Fehlerkandidaten allem Anschein nach intakt sind. Darauf hin wird die Fehlerkandidatenliste aktualisiert. Die daraus resultierende Liste (Tabelle A.2 auf Seite 141) wird erneut bewertet.

Teilprüfung 3 Im dritten Schritt wird dem System mitgeteilt, dass einer der verbliebenen Fehlerkandidaten allem Anschein nach tatsächlich defekt ist. Die Fehlerkandidatenliste wird darauf hin erneut aktualisiert (Tabelle A.3 auf Seite 142) und das Verhalten des Systems bewertet.

Die Ergebnisse aller drei Teilprüfungen stimmen mit den im jeweiligen Prüffall formulierten Erwartungen überein. Die Prüfung der Grundfunktionen ist somit bestanden.

Prüfung mit komplexem Fehlerbild

Bei diesem Testfall (ab Seite 142) werden der wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung mehrere Fehlersymptome übergeben, die eine gemeinsame Ursache haben könnten. Das bedeutet, es existiert ein Bauteil, das durch einen Defekt alle Symptome hervorgerufen haben könnte. Im ersten Schritt wird das Verhalten des Systems untersucht, wenn ihm jeweils nur eines der Symptome bekannt ist. Im zweiten Schritt werden dem System alle Symptome gemeinsam übergeben. Die Erwartung ist, dass die mögliche gemeinsame Ursache im zweiten Fall wesentlich stärker gewichtet ist.

Das beobachtete Verhalten des Systems entspricht den Erwartungen. Die Prüfung wird als bestanden bewertet.

Unabhängige Fehler mit manueller Symptomeingabe

Bei diesem Testfall (ab Seite 144) werden zwei Fehlersymptome in das System eingegeben. In diesem Fall ist jedoch einer der Fehlerfälle kein DTC, sondern eine Kundenwahrnehmung. Im Gegensatz zum letzten Testfall sind die Fehler in diesem Fall unabhängig voneinander. Das bedeutet, dass es im Bayes-Netz zwischen den betreffenden Knoten keine Abhängigkeiten gibt. Es sollten zwei unabhängige Cluster von Fehlerkandidaten entstehen. Es wird untersucht, ob sich die entsprechenden Cluster im Netz tatsächlich unabhängig voneinander verhalten.

Im Test konnte die Unabhängigkeit der Cluster nachgewiesen werden. Die Ergebnisse entsprechen den Erwartungen, so dass die Prüfung als bestanden bewertet wird.

Einfluss von Fehlern in Strukturdaten

Bei diesem Testfall (ab Seite 145) werden die Auswirkungen von Fehlern in den strukturbeschreibenden Daten untersucht. Dabei wurden bestimmte variantenspezifische Besonderheiten (Mehrausstattungen) nachträglich aus dem Datensatz entfernt. Es wird untersucht, wie sich dies auf das Verhalten der Fehlerkandidatenermittlung auswirkt.

Erwartungsgemäß werden die aus dem Datensatz entfernten Komponenten nicht berücksichtigt, wodurch die Fehlerkandidatenliste im Bezug auf das tatsächliche Fahrzeug unvollständig ist. Eine Robustheit bezüglich Fehlern in Strukturdaten ist bei diesem Verfahren nur bedingt gegeben. Das System stellt keine grundlegend falsche Diagnose. Die Menge der ermittelten Kandidaten ist jedoch nicht korrekt. Das System funktioniert mit dieser Einschränkung jedoch weiterhin den Erwartungen entsprechend. Die Prüfung wird als mit Einschränkungen bestanden gewertet.

Einfluss von Fehlern in Felddaten

Bei diesem Testfall (ab Seite 146) werden die Auswirkungen von Fehlern in den Felddaten (ungenau oder falsche A-Priori-Wahrscheinlichkeiten der Komponenten) untersucht. Es wird erwartet, dass diese Art von Fehlern keinen Einfluss auf die Menge der Fehlerkandidaten hat, sondern lediglich auf die berechnete Fehlerwahrscheinlichkeit und damit möglicherweise auf die Reihenfolge innerhalb der gewichteten Fehlerkandidatenliste.

Das beobachtete Verhalten entspricht den Erwartungen. Die Prüfung wird als bestanden bewertet.

Speicherbedarf der Netze

Bei diesem Testfall (ab Seite 148) wird der Einfluss der beschriebenen Optimierungen auf das Bayes-Netz untersucht. Dabei werden die Anzahl der verschiedenen Knoten, die TCS sowie der notwendige Arbeitsspeicher zur Berechnung des Netzes untersucht. Es kann gezeigt werden, dass die Optimierungsverfahren für diesen Anwendungsfall gut geeignet sind und die Bayes-Netze dadurch auch auf weniger gut ausgestatteten Rechnern berechnet werden können.

Da gezeigt werden kann, dass das System die entsprechende Anforderung erfüllt, wird die Prüfung als bestanden bewertet.

Performance

Mit diesem Testfall (ab Seite 149) wird die Ausführungsgeschwindigkeit des Systems untersucht. Zu diesem Zweck wurden die Laufzeiten der verschiedenen Berechnungsschritte (Generierung des Netzes, Optimierung, Berechnung, usw.) gemessen und bewertet.

Die beobachtete Performance ermöglicht ein zügiges Arbeiten mit dem System. Die Prüfung wird deshalb als bestanden bewertet.

4.9 Zusammenfassung Kapitel 4

In diesem Kapitel wurde die Entwicklung eines Verfahrens zur wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung für elektrische Fahrzeugsysteme beschrieben. Das Verfahren verwendet ein Bayes-Netz zur Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeit aller Komponenten im Fahrzeug. Das Bayes-Netz wird automatisch generiert und kann dadurch alle variantenspezifischen Besonderheiten eines Fahrzeugs berücksichtigen. Für die Generierung des Netzes werden Informationen über das Bordnetz, die verbauten Steuergeräte sowie Ausfallwahrscheinlichkeiten der einzelnen Komponenten benötigt. Diese Informationen lassen sich im Gegensatz zu manuell erstellten Wissensbasen heutiger Diagnosesysteme automatisch aus bestehenden Systemen der Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung eines Automobilkonzerns extrahieren. Die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung versetzt ein Diagnosesystem in die Lage, selbständig von vorhandenen Symptomen auf mögliche Fehlerursachen zu schließen. In der Diplomarbeit [Sch06] ist die prototypische Umsetzung der Algorithmen beschrieben. Das gesamte Verfahren der wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung ist zum Patent angemeldet ([KBMb]).

5. | Individuelle Generierung von Prüfschritten

In den Diagnosesystemen, die heute in den Werkstätten eingesetzt werden, kommen manuell erstellte Fehlersuchprogramme zum Einsatz. Die Aufgabe der Fehlersuchprogramme besteht darin, dem Mechaniker nacheinander eine Reihe von Prüfungen vorzuschlagen, um die Ursache des vorliegenden Fehlers so weit wie möglich einzugrenzen. Dafür ist es notwendig, dass für alle Fehler, die auftreten könnten, spezielle Fehlersuchprogramme von Experten erstellt werden. Auf Grund der Anzahl der elektrischen und mechanischen Komponenten sowie der hohen Anzahl möglicher Ausstattungsvarianten ist die Erstellung der Fehlersuchprogramme und auch deren Überprüfung auf Korrektheit mit sehr hohem Aufwand verbunden.

In diesem Kapitel werden mehrere Verfahren zur automatischen Generierung von Prüfungen beschrieben. Die Verfahren wurden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und in einem eigens dafür erstellten Diagnosesystem umgesetzt und erprobt. Diese Verfahren zur automatischen Generierung von Prüfungen haben folgende Vorteile gegenüber bestehenden Verfahren:

- Die Prüfungen sind fahrzeugindividuell und berücksichtigen dadurch Besonderheiten der vorliegenden Ausstattungsvariante.
- Die Entwicklung und Erweiterung der Prüfgeneratoren ist mit deutlich geringerem Aufwand verbunden, als die manuelle Erstellung zahlreicher Fehlersuchprogramme.
- Der Aufwand für die Validierung ist wesentlich geringer, da lediglich die Generatoren und nicht jedes einzelne Fehlersuchprogramm überprüft werden müssen.
- Prüfungen, die ein besonderes Maß an Expertenwissen erfordern, können weiterhin manuell erstellt und eingebunden werden.

Die Gliederung dieses Kapitels ist ähnlich der des Kapitels 4. Zu Beginn erfolgt eine detaillierte Anforderungsdefinition. Im Anschluss daran werden die im Rahmen der Arbeit entwickelten Verfahren zur individuellen Generierung von Prüfschritten beschrieben. Die softwaretechnische Umsetzung der Verfahren wird nicht beschrieben. Am Ende des Kapitels werden ausgewählte Tests vorgestellt, die mit der entwickelten Software durchgeführt wurden. Die Tests sollen zeigen, dass die Software den gestellten Anforderungen gerecht wird. Darüber hinaus sollen die praxisnah gewählten Testfälle zur Validation zeigen, wie sich das Verfahren im vorgesehenen Einsatzbereich verhält.

5.1 Anforderungen an die Generierung von Prüfschritten

Die im Folgenden identifizierten Anforderungen bzgl. der Verfahren zur individuellen Generierung von Prüfschritten wurden aus den analysierten Problemen bestehender Systeme und den daraus abgeleiteten Zielen (vgl. Abschnitt 3.2) abgeleitet.

/19/ Die einzelnen Prüfschritte sollen dem Anwender in Form von Bildschirmdialogen, die Prüfanweisungen und Zusatzinformationen enthalten, angezeigt werden.

⇒ Umsetzung: S. 64 ff. Test: S. 150 ff.

/20/ Es sollen Verfahren gefunden und umgesetzt werden, die für ein bekanntes elektrisches System Einzelprüfungen für eine gegebene Menge von Bauteilen ermitteln.

⇒ Umsetzung: S. 65 ff. Test: S. 150 ff.

- /21/ Die Prüfungen sollen Anweisungen zur Messung elektrischer Größen wie Widerstände, Spannungen, Ströme und zur Überprüfung elektrischer Bauteile enthalten.
⇒ Umsetzung: S. 65 ff. Test: S. 150 ff.
- /22/ Die Prüfungen sollen aus einem internen Modell abgeleitet werden, welches das elektrische System repräsentiert.
⇒ Umsetzung: S. 65 ff. Test: S. 150 ff.
- /23/ Zur Überprüfung des Leitungsstrangs soll das System Durchgangsprüfungen zwischen Messpunkten (Stecker, Verschraubungen) generieren.
⇒ Umsetzung: S. 66 ff. Test: S. 150 ff.
- /24/ Das System soll Signalbeschreibungen (die z.B. den zulässigen Spannungsbereich am Anschluss einer Komponente in einem definierten Systemzustand beschreibt) einlesen können.
⇒ Umsetzung: S. 68 ff. Test: S. 152 ff.
- /25/ Die eingelesenen Signalbeschreibungen sollen an der richtigen Stelle in der elektrischen Strukturbeschreibung angetragen und entlang des Kupferpfades¹ propagiert werden.
⇒ Umsetzung: S. 68 ff. Test: S. 152 ff.
- /26/ Gemäß der Signalbeschreibungen sollen Spannungsprüfungen generiert werden.
⇒ Umsetzung: S. 70 ff. Test: S. 152 ff.
- /27/ Gemäß der Signalbeschreibungen sollen Masseprüfungen generiert werden.
⇒ Umsetzung: S. 72 ff. Test: S. 152 ff.
- /28/ Es sollen auch bei unvollständigen oder fehlenden Signaldefinitionen sinnvolle Prüfungen für alle Bauteile generiert werden
⇒ Umsetzung: S. 69 ff. Test: S. 156 ff.
- /29/ Es soll für jede Prüfung die Menge der geprüften Komponenten ermittelt werden.
⇒ Umsetzung: S. 68 ff. Test: S. 150 ff.
- /30/ Müssen für die Durchführung einer Messung Koppelstecker aufgetrennt werden, soll die Prüfanweisung angeben, an welcher Seite des Koppelsteckers gemessen werden soll.
⇒ Umsetzung: S. 67 ff. Test: S. 154 ff.
- /31/ Das System soll, auch wenn theoretisch sehr viele Prüfungen für einen Fehlerkandidaten generiert werden könnten, lediglich eine vorgegebene maximale Menge an sinnvollen Prüfungen erzeugen.
⇒ Umsetzung: S. 67 ff. Test: S. 154 ff.

5.2 Generierung und Ausgabe von Prüfungen

Das Anzeige- und Bedienkonzept soll ähnlich der GFS (vgl. Abschnitt 2.1.3) aus einer Abfolge von Dialogen (Prüfanweisungen) bestehen. Bei der GFS werden die einzelnen Dialoge von den Autoren der Fehlersuchprogramme durch Eingabe von Texten und graphischen Elementen erstellt.

5.2.1 Parametrierbare Prüfanweisungen

In dem hier vorgestellten Diagnosesystem werden die Bildschirmdialoge mit Hilfe parametrierbarer Prüfanweisungen generiert. Für jede Art von Prüfungen gibt es vorgefertigte Templates. Dies sind Schablonen für Bildschirmdialoge, welche an verschiedenen Stellen Platzhalter enthalten. Bei der Parametrierung werden die Platzhalter durch konkrete Bezeichner oder Werte ersetzt. So wird der Prüfanweisung z.B. die genaue Bezeichnung des Steckers, die Pins, an denen

¹vgl. S. 66

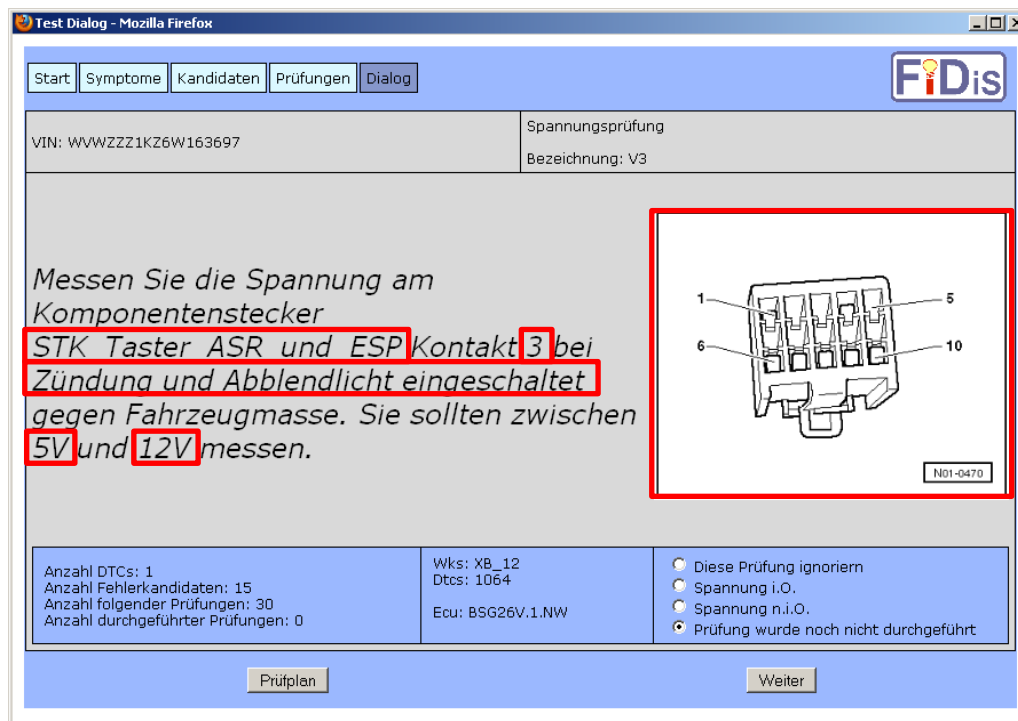


Abbildung 5.1.: Prüfanweisung einer Spannungsprüfung (die rot umrandeten Elemente wurden zur Laufzeit hinzugefügt)

gemessen werden soll, der Verbauort und (wenn vorhanden) eine Abbildung des Steckers und/oder der Komponente übergeben. Parametrierbare Prüfanweisungen sind in hohem Maße wiederverwendbar. Deshalb muss lediglich eine geringe Anzahl davon erstellt werden.

Die Abbildung 5.1 zeigt eine generierte Prüfanweisung. Der Mechaniker wird aufgefordert, bei eingeschalteter Zündung und eingeschaltetem Licht an einem Stecker die Spannung zu messen. Die rot umrandeten Elemente in der Abbildung werden zur Laufzeit eingesetzt. Durch den Einsatz der parametrierbaren Prüfanweisungen haben Prüfungen der gleichen Art (beispielsweise einer Spannungsmessung an einem Stecker) immer das gleiche Erscheinungsbild und können somit vom Anwender schnell erfasst werden. Auch die Übersetzung in andere Sprachen wird deutlich vereinfacht, da lediglich die Templates und die Bezeichnungen übersetzt werden müssen.

5.2.2 Prüfgeneratoren

Die Generierung der Prüfungen arbeitet nach dem Prinzip, das auch ein Techniker oder Ingenieur in diesem Fall anwenden würde. Nachdem auf Grund der Fehlersymptome eine Anzahl möglicher Fehlerkandidaten ermittelt wurde, werden diese im Stromlaufplan gesucht. Danach werden mit Hilfe des Stromlaufplans und elektrotechnischen Wissens über Fehlersuche und Messtechnik mögliche Messungen ausgewählt und durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen bestätigen oder entkräften die vermuteten Fehlerkandidaten.

Der Prüfgenerator enthält als Eingangsgröße eine Liste mit Fehlerkandidaten aus der im Kapitel 4 vorgestellten wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung. Darüber hinaus bekommt der Prüfgenerator die elektrische Strukturbeschreibung des Fahrzeugs, die bereits für die Generierung des Bayes-Netzes verwendet wurde.

Für die Generierung von Prüfungen wird auf Basis der Strukturbeschreibung ein Graph generiert. Darin wird jedes im Fahrzeug vorhandene elektrische Bauteil durch einen Knoten repräsentiert. Die Kanten zwischen den Knoten sagen aus, welche Komponenten miteinander verbunden sind. Die Abbildung 5.2 zeigt auf der linken Seite einen Ausschnitt aus dem Stromlaufplan eines Fahrzeugs, der die Spannungsversorgung (Plusseite) von drei Steuergeräten darstellt. Jedes elektrische

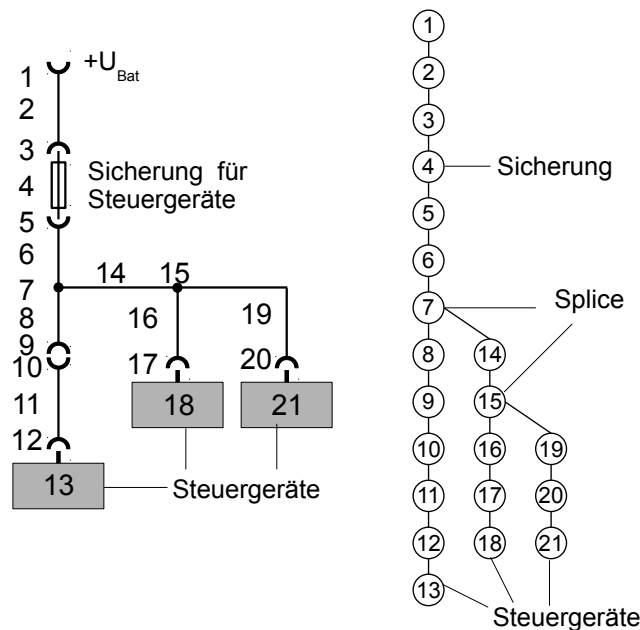


Abbildung 5.2.: Ausschnitt aus einem Stromlaufplan und dem dazugehörigen Graph

Bauteil einschließlich der Leitungen, Steckkontakte und Splices (Leitungsverbindungen) ist mit einer eindeutigen ID versehen. Auf der rechten Seite der Abbildung ist der entsprechende Graph dargestellt.

5.3 Generierung von Durchgangsprüfungen

Eine häufige Ursache für Fehler in der Fahrzeugelektronik sind gebrochene, gerissene oder anderweitig beschädigte Leitungen sowie beschädigte oder verschmutzte Kontakte an Steckverbindern oder Verschraubungen. Fehlern dieser Art werden auch als Kupferfehler bezeichnet, da der elektrische Leiter (meist Kupfer) beschädigt ist. Sie lassen sich in den meisten Fällen mit Hilfe von Durchgangsprüfungen finden. Korrosion sowie einige Arten leichter Beschädigungen an Steckern und Leitungen führen nicht zu einer vollständigen Unterbrechung, sondern lediglich zu einem erhöhten Widerstand. Durchgangsprüfer können diese Fehler unter Umständen nicht erkennen. Aus diesem Grund sollten Durchgangsprüfungen immer mit einem Widerstandsmessgerät durchgeführt werden.

Für die Generierung von Durchgangsprüfungen sucht der Prüfgenerator im ersten Schritt das betroffene Bauteil innerhalb der Fahrzeugstruktur. Im zweiten Schritt wird ausgehend von den Nachbarn des Fehlerkandidaten nach allen erreichbaren Messpunkten gesucht. Messpunkte sind Steckverbinder oder Verschraubungen, an denen ein Widerstandsmessgerät angeschlossen werden kann.

Es kommen nur die Messpunkte in Frage, die elektrisch direkt mit dem Fehlerkandidaten verbunden sind. Sobald ein komplexeres elektrisches Bauteil, wie ein Steuergerät, ein Relais oder eine Lampe in der Struktur gefunden wird, bricht die Suche nach möglichen Messpunkten in diesem Pfad ab. Ein Pfad innerhalb des Stromlaufplans, der nicht durch ein komplexes Bauteil² unterbrochen ist, wird im Folgenden als Kupferpfad bezeichnet.

Es wird angenommen, dass der Splice (Nummer 7) aus Abbildung 5.2 ein potentieller Fehlerkandidat ist. Zur Ermittlung der Messpunkte wird der Graph – wie in Abbildung 5.3 dargestellt – umgeformt. Der Knoten 7 hat drei Nachbarn. Dadurch ergeben sich drei Teilgraphen unterhalb

²Sicherungen werden in diesem Zusammenhang nicht als komplexes Bauteil, sondern als elektrisch leitende Verbindung angesehen

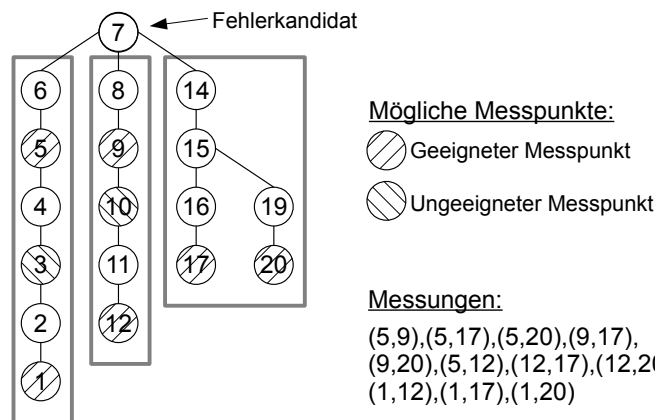


Abbildung 5.3.: Ermittlung von Messpunkten für Splice Nr. 7 aus Abbildung 5.2

des Knoten. Ein Suchalgorithmus durchsucht alle Teilgraphen nach Messpunkten. Sie sind in der Grafik schraffiert dargestellt.

Es existieren zwei grundlegende Verfahren, die für eine solche Suche in Frage kommen. Bei der Tiefensuche (engl. depth-first-search [SS02]) wird immer ein Teilgraph vollständig von oben nach unten abgearbeitet, bevor der nächste Teilgraph bearbeitet wird. In Abbildung 5.3 werden demnach die Messpunkte in der Reihenfolge 5, 3, 1, 9, 10, 12, 17, 20 gefunden³. Bei der Breitensuche (engl. breadth-first-search [SS02]) werden zuerst alle unmittelbaren Kindknoten, anschließend alle Kindknoten zweiten Grades und so weiter betrachtet. Dadurch werden die Messpunkte in der Reihenfolge 5, 9, 10, 3, 17, 20, 12, 1 gefunden. Wenn der Graph vollständig durchsucht wird, ist die Menge der gefundenen Elemente bei beiden Verfahren die gleiche. Eine vollständige Suche ist aber nicht immer sinnvoll, da unter Umständen mehrere Hundert Messpunkte gefunden werden können, was zu tausenden möglicher Prüfungen führen würde. Im Abschnitt 5.1 wurde die Anforderung definiert, dass die Generierung der Prüfungen eine maximal zulässige Zeit nicht überschreiten darf. Dies lässt sich dadurch erreichen, dass die Suche nach Messpunkten nach einer vorgegebenen Zeit oder der maximalen Anzahl abgebrochen wird.

Im beschriebenen Beispiel können 8 Messpunkte gefunden werden. Wenn die Suche nach 6 Elementen abgebrochen wird, ergibt die Tiefensuche die Elemente 5, 3, 1, 9, 10, 12 daraus lassen sich die Prüfungen (5, 9), (5, 10), (5, 12), (3, 9), (3, 10), (3, 12), (1, 9), (1, 10), (1, 12) generieren. Es ist zu erkennen, dass dadurch nur zwei der drei Leitungen am Splice 7 (Fehlerkandidat) überprüft werden. Sollte die Verbindung zur Leitung 14 unterbrochen sein, würde dies durch keine der Prüfungen erkannt werden. Eine Breitensuche, die nach 6 Elementen abgebrochen wird, würde die Elemente 5, 9, 10, 3, 17, 20 finden. Daraus lassen sich die Prüfungen (5, 9), (5, 10), (5, 17), (5, 20), (3, 9), (3, 10), (3, 17), (3, 20), (9, 17), (9, 20), (10, 17), (10, 20) generieren. Diese Prüfungen berücksichtigen alle Anschlüsse am Splice. Bei der Implementierung des Systems muss deshalb eine Breitensuche verwendet werden.

Für das Durchführen einer Messung an einer Steckverbindung muss diese aufgetrennt werden. Nur eine der beiden Hälften kann für die Messung verwendet werden. Es kommen demnach nur ein Teil der gefundenen Messpunkte für eine Messung in Frage. Bei einem Steckerpaar, wie den Knoten 9 und 10 in Abbildung 5.3, kann nur 9 verwendet werden. Von den beiden Kontakten 3 und 5 der Sicherung ist nur der Kontakt 5 ein sinnvoller Messpunkt. Um dies zu erkennen, muss der Suchalgorithmus um die folgenden Regeln erweitert werden:

- Wenn ein potentieller Messpunkt ein Koppelstecker ist und der unmittelbare Vorgängerknoten ebenfalls, dann darf er nicht als Messpunkt verwendet werden.

³Knoten, die keine Messpunkte sind (nicht schraffiert), werden nicht in die Ergebnismenge übernommen

- Bei einem Sicherungshalter wird nur der Kontakt als Messpunkt verwendet, der näher am Fehlerkandidaten ist (bei der Suche als Erstes gefunden wird).

Da der Knoten 7 drei Kindknoten hat, entstehen als Ergebnis der Messpunktsuche drei Mengen mit jeweils zwei Elementen (vgl. Abbildung 5.3). Auf Grund der Kombinationsmöglichkeiten lassen sich daraus 12 Durchgangsprüfungen ableiten, die jeweils über den Splice messen.

Jede der Durchgangsprüfungen prüft mehr Bauteile als nur den Fehlerkandidaten ab. Deshalb werden für alle Prüfungen vollständige Listen mit allen geprüften Komponenten erzeugt und innerhalb der jeweiligen Prüfungen abgelegt. Dies ist notwendig, damit das Ergebnis einer Prüfung, sobald es vorliegt, vom Diagnosesystem interpretiert werden kann.

Wenn die Messung ergeben hat, dass eine elektrische Verbindung zwischen den Messpunkten besteht, kann davon ausgegangen werden, dass alle Bauteile des geprüften Pfades in Ordnung sind. In Verbindung mit der wahrrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung wird die Fehlerwahrscheinlichkeit aller dieser Komponenten auf 0,0 gesetzt. Wird durch die Messung ein Fehler erkannt, werden die überprüften Bauteile anteilig belastet. Die n.i.O. -Messung belegt, dass die gesamte Reihenschaltung eine Fehlerwahrscheinlichkeit von 1,0 hat. Wie im Abschnitt 4.7.2 beschrieben, führt die anteilige Belastung der Komponenten dazu, dass die Fehlerwahrscheinlichkeit aller Komponenten angehoben wird. Ausgenommen davon sind Komponenten mit harter Evidence ($P = 0,0$ oder $P = 1,0$). Je kürzer der geprüfte Pfad ist, desto stärker erhöht sich die Fehlerwahrscheinlichkeit der einzelnen Komponenten, für die keine Gewissheit (harte Evidenz) besteht.

5.4 Überprüfung der Spannungsversorgung

Im vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, dass die häufigsten Fehler im Bordnetz eines Fahrzeugs (Unterbrechungen) mit Hilfe von Durchgangsprüfungen (Widerstandsmessungen) gefunden werden können. Dies ist jedoch in den meisten Fällen nicht die effizienteste Methode, da immer mindestens zwei Messpunkte freigelegt werden müssen. Gerade bei Fehlern, welche die Spannungsversorgung von Bauteilen betreffen, ist es sinnvoller, wenn das Diagnosesystem Prüfungen vorschlägt, mit denen die Spannungsversorgung und die Masseverbindung direkt am Bauteil überprüft werden können.

5.4.1 Propagierung von Signalen

Damit der Prüfgenerator Spannungsmessungen und Masseprüfungen erzeugen kann, muss er Aussagen darüber treffen können, welche Signale an einem Messpunkt anliegen sollten und welche Vorbedingungen dafür erfüllt sein müssen. Zu diesem Zweck wurde die elektrische Strukturbeschreibung aus Kapitel 4 um zusätzliche Signaldefinitionen erweitert. Signaldefinitionen sind Attribute, die für ein bestimmtes Element der Strukturbeschreibung, z. B. eine Sicherung oder einen Pin eines Steuergerätes, definiert sein können. Sie beschreiben jeweils die zu messende Spannung so, wie sie in einem fehlerfreien System sein sollte und geben an, welche Vorbedingungen (z. B. Zündung eingeschaltet) dafür erfüllt sein müssen.

Die Tabelle 5.1 zeigt exemplarisch einige Signaldefinitionen. In der Umsetzung des Diagnosesystems sind die Signaldefinitionen in einer XML-Datei gespeichert. Diese enthält zusätzlich für jeden Messpunkt eine eindeutige Bezeichnung, die der aus der Strukturbeschreibung entspricht. Dies ist notwendig, damit die Signaldefinitionen immer an der richtigen Stelle der Strukturbeschreibung eingetragen werden. Die gültigen Spannungsbereiche werden nicht natürlichsprachig wie in Tabelle 5.1 abgelegt, sondern in einer genau definierten Form, damit sie für eine automatische Auswertung von Messergebnissen verwendet werden können. Dies wird im Abschnitt 5.7 beschrieben.

Signalbezeichnung	Signalquelle	Signalbeschreibung	Vorbedingung
+Ubat	Pluspol der Batterie	zwischen 10V und 14V	keine
GND	alle Massepunkte	Massepotenzial	keine
Spannungsversorgung für Steuergeräte 13, 18, 21	Abgang Sicherung 4	zwischen 10V und 14V	keine
Spannungsversorgung Kl. 15 Radio	Abgang Sicherung 25	zwischen 10V und 14V	Zündung eingeschaltet
Instrumentenbeleuchtung	Bordnetzsteuergerät Stecker B Pin 12	zwischen 5V und 12V	Zündung und Abblendlicht eingeschaltet

Tabelle 5.1.: Beispiele für Signaldefinitionen

Die Signaldefinitionen sind keine fahrzeugindividuellen Informationen, sondern für eine ganze Baureihe gültig. Sobald die Ausstattung eines Fahrzeugs ein bestimmtes Bauteil, z. B. ein Steuergerät, enthält, werden die Signaldefinitionen an die jeweiligen Anschlüsse angetragen.

Die Beschreibung der Signale ist i. d. R. Expertenwissen, das nicht wie die Strukturdaten automatisch aus Konstruktions- und Fertigungsdaten abgeleitet werden kann. Der notwendige manuelle Aufwand zur Erstellung und Pflege der Wissensbasis muss allerdings nicht besonders hoch ausfallen. Untersuchungen (vgl. Abschnitt A.2.4) haben gezeigt, dass auch wenn nur ein geringer Teil der im Fahrzeug vorhandenen Signale definiert ist (z. B. nur Spannungsversorgungen und Masseverbindungen), bereits für sehr viele Komponenten Prüfungen generiert werden können. Dadurch kann in vielen Fällen auf die aufwändigeren Durchgangsprüfungen verzichtet werden.

Ein Signal wird immer nur an einem Punkt im Stromlaufplan definiert. Von dort aus wird es entlang des Kupferpfades propagiert. In Folge davon kennt jeder Messpunkt innerhalb des gleichen Pfades seinen Signaltyp. Der Kupferpfad endet, sobald ein komplexes Bauteil (z. B. ein Steuergerät oder eine Glühlampe) gefunden wird. Diese Bauteile können den Signaltyp ändern. So hat eine Glühlampe beispielsweise auf der einen Seite +12V und auf der anderen Massepotenzial.

In Tabelle 5.1 ist in Zeile 3 die „Spannungsversorgung für Steuergeräte 13, 18, 21“ definiert. Die Signalquelle ist der Abgang der Sicherung 4 (vgl. dazu Abbildung 5.2). Wird der Sicherungskontakt als Signalquelle definiert, wird nicht in Richtung der dazugehörigen Sicherung propagiert. Dies stellt eine Besonderheit dar. Das Signal wird nur in Richtung Verbraucher (Knoten 6) weitergegeben. Würde das Signal auch über die Sicherung in Richtung Batterie weitergegeben werden, würde es sich von dort aus auch in alle anderen Stromkreise verbreiten. Die Abbildung 5.4 zeigt das Ergebnis des Propagierens.

In der Abbildung 5.4 ist auf der linken Seite das Signal +Ubat zu sehen, welches auch in Tabelle 5.1 definiert ist. Es wurde ausgehend von der Batterie (nicht dargestellt) bis zur Sicherung 4 propagiert. Wäre für den Sicherungskontakt 5 kein neues Signal definiert worden, wäre +Ubat bis zu den Steuergeräten hin propagiert worden.

Jeder Knoten speichert beim Propagieren das Signal, das er von einem Nachbarknoten bekommen hat, lokal ab und gibt es an alle übrigen Nachbarn weiter⁴. Darüber hinaus wird ein Verweis auf den Nachbarknoten, von dem er das Signal bekommen hat, dauerhaft abgespeichert. Ist er selbst Signalquelle, fehlt dieser Verweis. Dadurch lässt sich ein Signalpfad von einem Messpunkt, an dem ein Signal angetragen ist, rückwärts bis zur Signalquelle ermitteln. Diese Funktionalität wird für das Auswerten des Ergebnisses einer Spannungsprüfung benötigt.

⁴Dabei fragt der Knoten den Typ seines Nachbarn ab. Ist er ein komplexes Bauteil oder eine Sicherung und der Knoten selbst Sicherungsabgang und Signalquelle, wird das Signal an diesen Nachbarknoten nicht weitergereicht.

5.4.2 Generierung von Spannungsmessungen

Um Spannungsprüfungen für bestimmte Fehlerkandidaten zu generieren, werden diese zunächst in der Fahrzeugstruktur gesucht. Als Nächstes wird überprüft, ob an ihnen ein Signal angetragen ist. Ist dies der Fall, wird ausgehend von jedem Fehlerkandidaten ein Graph über alle Knoten aufgespannt, an die er selbst das Signal weitergegeben hat. Beispielsweise gibt der Knoten 15 in Abbildung 5.4 sein Signal an die Knoten 16, 17, 19 und 20 weiter. Wenn der Kandidat (15) defekt (Unterbrechung) ist, dürfte das Signal an den Messpunkten 17 und 20 nicht mehr messbar sein. Für jeden der Messpunkte innerhalb des Graphen wird deshalb je eine Spannungsprüfung erzeugt. Wenn das Signal an diesen Punkten durch Messung nachgewiesen werden kann, lässt dies darauf schließen, dass der Fehlerkandidat in Ordnung ist.

Unter Umständen kann es passieren, dass für einen Fehlerkandidaten, genau wie bei den Durchgangsprüfungen, sehr viele Spannungsprüfungen generiert werden können. Deshalb besteht auch hier die Notwendigkeit, die Generierung von Prüfungen nach einer gewissen Anzahl abubrechen. Um sicher zu stellen, dass die Ergebnismenge alle naheliegenden Prüfungen enthalten sind, muss auch hier eine Breitensuche (vgl. Abschnitt 5.3) verwendet werden.

Im Diagnosesystem müssen Prüfungen für alle Elemente der Fehlerkandidatenliste generiert werden. Benachbarte elektrische Komponenten, die als Fehlerkandidaten in Frage kommen, führen i. d. R. zu einer gleichen oder ähnlichen Menge an Prüfungen. Wenn eine Prüfung fehlschlägt, kann nicht gesagt werden, welcher/welche der überprüften Komponenten defekt sind. Ergibt die Messung, dass das propagierte Signal am Messpunkt ankommt, geht das Diagnosesystem davon aus, dass nicht nur der Fehlerkandidat, sondern alle Bauteile innerhalb des Signalpfades (von der Quelle bis zum Messpunkt) in Ordnung sind.

Wenn in dem Beispiel aus Abbildung 5.4 am Messpunkt 12 nicht zwischen 10V und 14V gemessen wird, kann dies auch daran liegen, dass die Batterie leer, die Sicherung defekt oder der Pfad zwischen Batterie und Sicherung gestört ist. Es ist zu erkennen, dass der Zustand eines Signalpfades auch vom Zustand des vorgelagerten Pfades abhängt. Welcher der vorgelagerte Pfad ist, ist jedoch nicht immer so einfach zu erkennen wie bei der Sicherung im Beispiel. Bei einem komplexen Bauteil wie einem Steuergerät muss deshalb in der Steuergerätebeschreibungsdatei dieser Zusammenhang beschrieben sein.

In Abbildung 5.5 sind drei Spannungsmessgeräte dargestellt, welche drei durchgeführte Spannungsmessungen gegen Fahrzeugmasse repräsentieren. Am Messpunkt 12 wurden 12V gemessen.

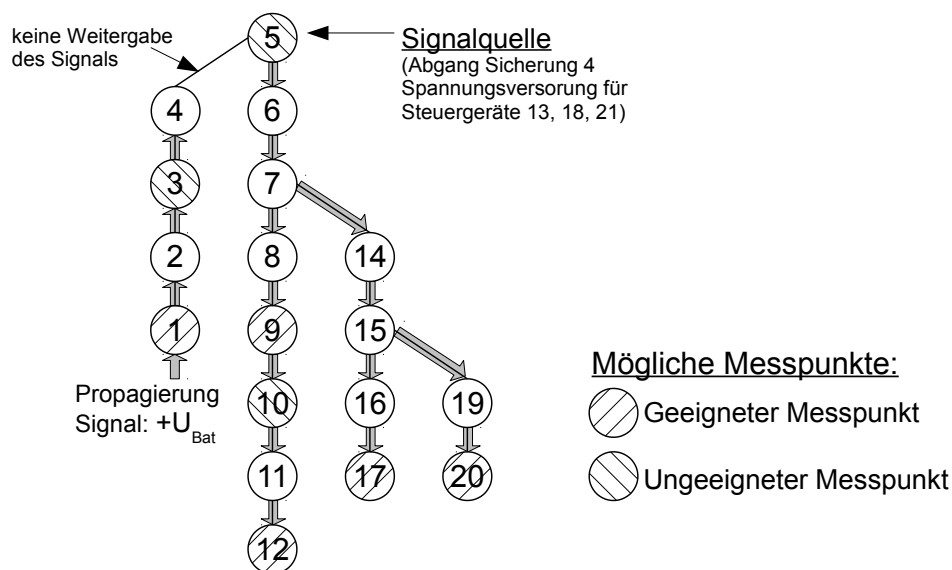
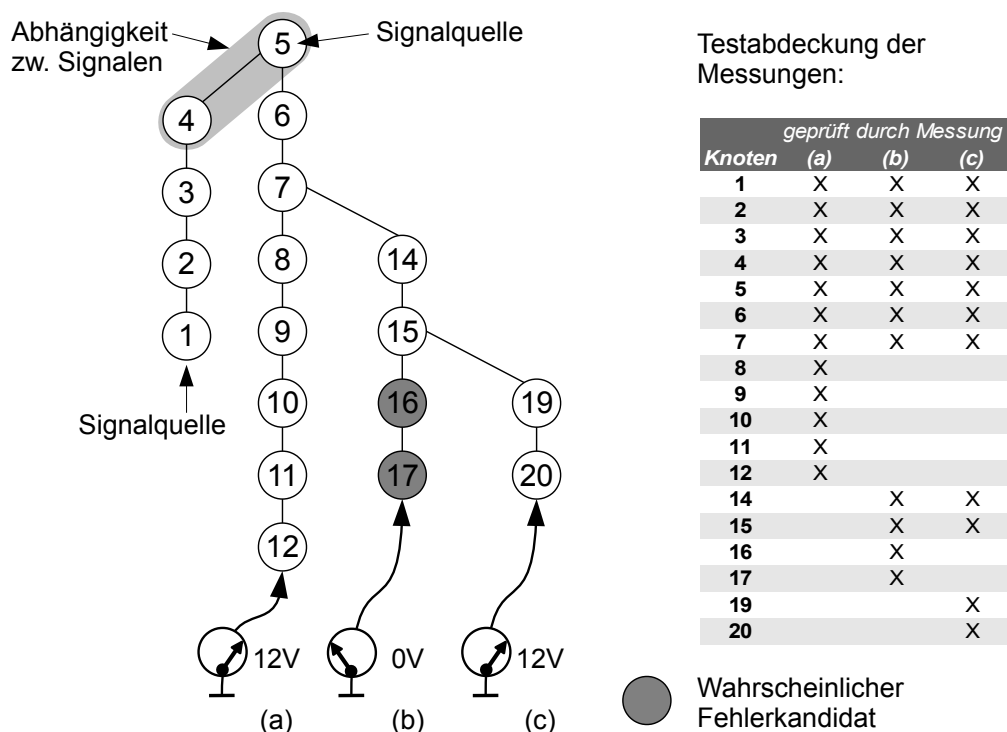


Abbildung 5.4.: Signalpropagierung ausgehend vom Abgang der Sicherung 4

**Abbildung 5.5.:** Spannungsprüfung an drei Messpunkten

weiße Knoten: Fehler unwahrscheinlich, graue Knoten: Fehler wahrscheinlich

Dies ist nach Tabelle 5.1 innerhalb des zulässigen Bereichs. Deshalb wird für alle Komponenten des Signalpfades von Knoten 12 zurück bis Knoten 5 eine Fehlerwahrscheinlichkeit von 0,0 angesetzt. Da das Signal am Sicherungsabgang (Knoten 5) vom Signal der Sicherung abhängt, wird ebenfalls der Signalpfad von Knoten 4 bis zu dessen Signalquelle Knoten 1 entlastet. Die Messung am Messpunkt 20 entlastet zusätzlich die Komponenten 14, 15, 19 und 20. Die Tabelle in der Abbildung gibt für jede der drei Messungen an, welche Komponenten dadurch abgedeckt werden.

Die Messung am Messpunkt 17 weist auf einen Fehler hin. Dies führt dazu, dass der vollständige Signalpfad anteilig belastet wird. Der vollständige Signalpfad geht in diesem Fall nicht nur zurück bis zum Knoten 5, sondern auf Grund der Abhängigkeit bis zum Knoten 1. Wurden die beteiligten Komponenten nicht bereits vorher entlastet, kann man davon ausgehen, dass sie vor der Durchführung der Messung eine Fehlerwahrscheinlichkeit von $>0,0$ hatten⁵. Durch die anteilige Belastung wird jedoch nur die Fehlerwahrscheinlichkeit der Komponenten erhöht, die nicht bereits auf 0,0 gesetzt wurde (vgl. Abschnitt 4.7.2).

Das bedeutet: Wenn die Messungen *a* und *c* vor der Messung *b* durchgeführt wurde, werden die Komponenten 16 und 17 durch die anteilige Belastung mit zusammen 1,0 belastet, während die Fehlerwahrscheinlichkeit der übrigen Komponenten auf 0,0 gesetzt wird. Wenn Messung *b* zuerst durchgeführt wird, werden alle Komponenten des Signalpfades anteilig belastet (d.h. $P_{\text{Fehler}}(16) + P_{\text{Fehler}}(17) \leq 1,0$). Durch die anschließenden Messungen *a* und *c* werden alle übrigen Fehlerwahrscheinlichkeiten auf 0,0 gesetzt. Scheinbar hat bei diesem Verfahren also die Reihenfolge der Messungen einen Einfluss auf die Fehlerwahrscheinlichkeiten. Im Zusammenhang mit der wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung aus Kapitel 4 hat dies jedoch keine praktische Bedeutung. Wenn bis auf die beiden Komponenten 16 und 17 alle abhängigen Knoten eine harte Evidenz von 0,0 gesetzt haben, werden lediglich die beiden Komponenten

⁵Die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung hat wahrscheinlich für mindestens eine Komponente einen größeren Wert ausgerechnet, sonst wären die Prüfungen nicht generiert worden.

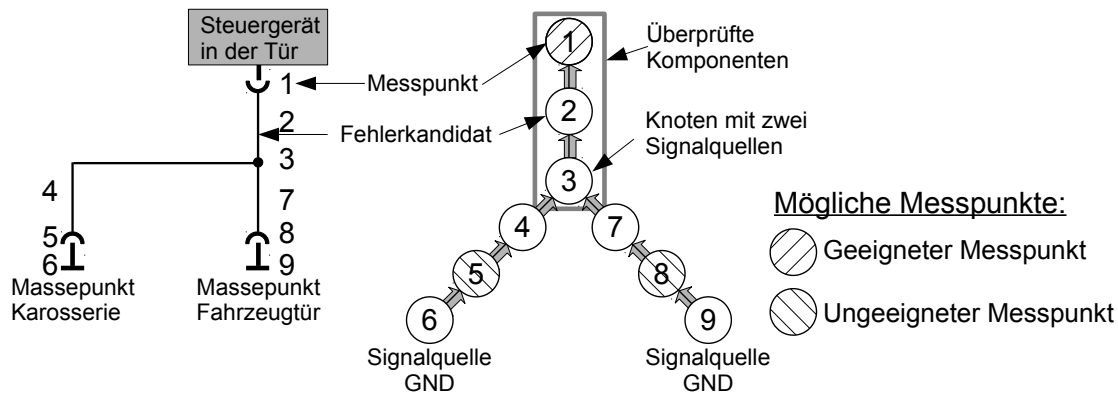


Abbildung 5.6.: Propagierung von Massesignalen

mit einer hohen Wahrscheinlichkeit belastet. Die resultierende Fehlerwahrscheinlichkeit hängt vom Verhältnis der beiden A-Priori-Wahrscheinlichkeiten sowie dem Verhältnis der anteiligen Belastung ab. Da die Verhältnisse unabhängig von der Reihenfolge der durchgeführten Messungen sind, sind diese demnach nicht relevant.

5.4.3 Generierung von Masseprüfungen

Im vorangegangenen Abschnitt wurde gezeigt, wie mit Hilfe einfacher Spannungsmessungen ein großer Teil des Bordnetzes eines Fahrzeugs auf mögliche Fehler hin untersucht werden kann. Ein mindestens genau so großes Potenzial hat die Überprüfung der Masseverbindungen im Fahrzeug. Masseverbindungen lassen sich am einfachsten mit einem Widerstandsmessgerät testen, indem zwischen einem Messpunkt, an dem Massepotenzial anliegen sollte, und einer blanken Stelle an der Karosserie oder am Motor gemessen wird. Um zu ermitteln, welche Messpunkte dafür in Frage kommen, wird die Regel aus Zeile zwei der Tabelle 5.1 angewendet. An allen Massepunkten⁶ wird dadurch das Signal „GND“ angetragen. Von dort aus wird es entlang der Kupferpfade zu den einzelnen Steckern (potentiellen Messpunkten) propagiert.

Bei der Auswertung der Messergebnisse – genauer gesagt bei der Ermittlung des überprüften Pfades – gibt es eine Besonderheit, auf die noch nicht eingegangen wurde. Bisher wurde davon ausgegangen, dass das Signal an einem Punkt (z. B. Abgang der Sicherung) definiert ist. Von dort aus wird beim Propagieren ein Baum aufgespannt, so dass sich von jedem Blatt des Baumes ein eindeutiger Pfad zur Wurzel ermitteln lässt. Dieser entsprach bisher dem überprüften Pfad.

Massepunkte gibt es jedoch viele in einem Fahrzeug, die darüber hinaus teilweise untereinander verbunden sind. Dies ist notwendig, da die Karosserie aus verschiedenen teilweise beweglichen Teilen (z. B. Türen) besteht, die miteinander elektrisch verbunden werden müssen. Auch Motor und Getriebe sind beweglich gelagert, so dass deren Massepunkte ebenfalls elektrisch mit denen der Karosserie verbunden sein müssen.

Die Abbildung 5.6 zeigt zwei Massepunkte – einen an der Karosserie und einen innerhalb der Fahrzeugtür – die durch eine Leitung verbunden sind. Über diesen Kupferpfad wird zusätzlich ein Steuergerät versorgt. Der Algorithmus zum Propagieren der Signale nimmt an, dass von jedem Massepunkt ein GND-Signal ausgeht. Wenn der Algorithmus während des Propagierens auf einen Knoten trifft, an dem bereits vorher GND als Signal angetragen wurde, wie dies beim Splice (Knoten 3) der Fall ist, wird ein Verweis auf einen weiteren Nachbarn als Signalquelle hinzugefügt. Das Signal braucht von dort aus nicht erneut propagiert zu werden.

⁶Massepunkte sind Verschraubungen z. B. Gewindebolzen an der Karosserie oder am Motor, an denen elektrische Leitungen mit einem Kabelschuh angeschraubt sind

In Abbildung 5.6 wird davon ausgegangen, dass die Leitung 2 ein potentieller Fehlerkandidat ist. Der Stecker (1) wird als einziger Messpunkt zur Überprüfung der Leitung 2 durch eine Masseprüfung identifiziert. Um zu ermitteln, welche Komponenten mit dieser Messung überprüft werden, werden – ausgehend vom Messpunkt entgegen der Propagierungsrichtung – alle Komponenten in eine Liste aufgenommen. Am Splice 3 sind zwei Nachbarknoten als Quelle des Signals markiert. Dies führt dazu, dass die Ermittlung der geprüften Komponenten an dieser Stelle abbricht. Die Ergebnismenge der durch die Messung überprüften Komponenten ist in der Abbildung durch einen Kasten markiert.

Da im Beispiel kein eindeutiger Pfad bis zur Signalquelle besteht, können keine Aussagen über den Zustand der Bauteile gemacht werden, die unterhalb des Splices dargestellt sind. Lediglich die Bauteile oberhalb des Splices können je nach Ergebnis der Prüfung entlastet oder anteilig belastet werden.

Bei der Generierung von Masseprüfungen muss diese Besonderheit berücksichtigt werden. Sollen für den Leitungsabschnitt 2 im Beispiel Prüfungen generiert werden, kann die Masseprüfung am Stecker 2 verwendet werden. Für die Leitungsabschnitte 4 und 7 stehen jedoch keine Messpunkte zur Generierung von Masseprüfungen zur Verfügung. Damit der Prüfgenerator dies erkennt, muss er folgendermaßen vorgehen. Zuerst wird der Fehlerkandidat (z.B. Leitungsabschnitt 4) in der Struktur gesucht und es wird überprüft, ob an diesem das Signal „GND“ angetragen ist. Anschließend wird, wie bereits beschrieben, entlang der Signalpropagierungsrichtung nach möglichen Messpunkten gesucht. Sobald die Suche auf den Splice 3 trifft und dort feststellt, dass dieser mehr als eine Signalquelle hat, bricht die Suche mit einer leeren Ergebnismenge ab. Auch wenn keine Masseprüfungen für den Leitungsabschnitt 4 gefunden werden, ist es natürlich dennoch möglich, Durchgangsprüfungen zu generieren.

Das Problem, dass das gleiche Signal über verschiedene Wege an einen Punkt kommt, kann nicht nur bei Masseverbindungen, sondern beim Einsatz von Ringleitungen und redundanter Stromversorgungen auch bei jedem anderen Signal vorkommen. Obwohl dies unüblich ist, kann der eingesetzte Prüfgenerator dies berücksichtigen, da er den gleichen Algorithmus für alle Signalprüfungen (auch Spannungsprüfungen) verwendet.

5.4.4 Gleichzeitige Überprüfung mehrerer Strompfade

Die Überprüfung der Spannungsversorgung und der Masseverbindung von Bauteilen ist sehr wichtig, um Fehlerursachen außerhalb des Bauteils ausschließen zu können. In den meisten Fällen ist es möglich, beide Prüfungen zusammen mit einer Messung zu realisieren. Dabei wird nicht jeweils vom spannungsführenden und masseführenden Pin des Steckers gegen Karosseriemasse gemessen, sondern in einem Arbeitsschritt direkt zwischen beiden Pins. Die Generierung und Auswertung dieser zusätzlichen Prüfungen ist relativ einfach.

Sobald für einen Stecker eine Spannungsprüfung sowie eine Masseprüfung von den Prüfgeneratoren der letzten beiden Abschnitte generiert wurde, werden diese zu einer Prüfung zusammengefasst. Die ausgegebene Prüfanweisung lautet in diesem Fall z. B. :

Messen Sie die Spannung zwischen den Pins 3 und 7!
Liegt die gemessene Spannung zwischen 10V und 14V?

Wenn die Prüfung ein positives Ergebnis (i.O.) liefert, werden sowohl aus dem Spannungsversorgungspfad als auch aus dem Massepfad alle Fehlerkandidaten entlastet. Im Fehlerfall werden alle Kandidaten anteilig belastet. Wenn mehr als eine Versorgungsspannung und eine Masse an eine Komponente geführt werden, kann das Diagnosesystem Kombinationen bilden und dadurch z. B. mit zwei Messungen vier Pfade überprüfen. Da gemeinsame Prüfungen mehrerer Strompfade i. d. R. sehr viele Kandidaten gemeinsam prüfen, sind sie im Fehlerfall sehr unpräzise, so dass es mitunter sinnvoll ist, separate Spannungsprüfungen und Masseprüfungen nachzuholen, um die Fehlerursache besser eingrenzen zu können.

5.5 Finden von Kurzschlüssen

Neben Unterbrechungen im Leitungsstrang gehören Kurzschlüsse zu den häufigsten Ursachen von Störungen in der Fahrzeugelektrik. Kurzschlüsse entstehen vor allem, wenn die Isolierung einer Leitung beschädigt wird und dadurch eine elektrische Verbindung zur Karosserie oder einer anderen Leitung entsteht. Dies passiert vor allem, wenn der Leitungsstrang z. B. im Bereich des Fahrwerks, in Türscharnieren oder verstellbaren Sitzen regelmäßig mechanisch beansprucht wird. Auch eine thermische Überbelastung der Leitungen (Verschmoren der Isolierung), z. B. im Bereich der Abgasanlage, kann zu Kurzschlüssen führen. Kurzschlüsse treten meistens gegen Masse (Karosserie) auf und nur in seltenen Fällen zwischen zwei Leitungen. Ist dies dennoch der Fall, liegt die Ursache meistens bei einem mechanisch beschädigten Stecker.

Abhängig davon, welche Art von Fehler ein Steuergerät erkannt hat, werden unterschiedliche Prüfungen generiert. Im Abschnitt 4.2.2 wurde anhand eines Beispiels gezeigt, dass der DTC2 (vgl. Tabelle 4.1 auf Seite 38) durch eine Unterbrechung oder einen Kurzschluss nach Masse hervorgerufen werden kann. In diesem Fall müssen deshalb zusätzlich zu den Prüfungen auf Unterbrechung (Durchgangsprüfungen, Signalprüfungen) Kurzschlussprüfungen gegen Masse generiert werden. Die Fehlerkandidatenermittlung speichert zu jedem Fehlerkandidaten eine Information darüber ab, auf Grund welchen Symptoms (einschließlich der Fehlerart) der Kandidat verdächtigt wird.

Der entwickelte Prüfgenerator erzeugt im Fall eines Kurzschlusses gegen Masse oder Versorgungsspannung spezielle Durchgangsprüfungen. Dafür wird der betreffende Kupferpfad zunächst freigestellt, indem alle angrenzenden elektrischen Bauteile (wie Steuergeräte) sowie Sicherungen entfernt werden. Mittels einer Durchgangsprüfung von einem Messpunkt innerhalb des Kupferpfades gegen Fahrzeugmasse oder Versorgungsspannung wird anschließend überprüft, ob ein Kurzschluss vorhanden ist. Beschädigte Stecker, die Kurzschlüsse zwischen Leitungen hervorrufen, lassen sich damit nicht finden. Im Abschnitt 5.6 wird beschrieben, wie das Diagnosesystem dem Mechaniker Hinweise zur Überprüfung von Steckern gibt.

Das Diagnosesystem sucht im fehlerbehafteten Kupferpfad nach Möglichkeiten, um diesen in Teilabschnitte zu zerlegen. In Abbildung 5.2 ist dies durch die Stecker 9 und 10 möglich. In einer Prüfanweisung werden dem Mechaniker die zu trennenden Stecker mitgeteilt. Nach dem Auftrennen werden für jeden Teilabschnitt Durchgangsprüfungen gegen Masse ausgegeben. Wenn der Kurzschluss im Teilabschnitt noch immer vorhanden ist, werden die enthaltenen Komponenten anteilig mit einer höheren Fehlerwahrscheinlichkeit belastet. Ist in dem Leitungsabschnitt kein Kurzschluss feststellbar und wurde auch keine Leitungsunterbrechung erkannt, werden die Fehlerwahrscheinlichkeiten der Leitungsabschnitte auf 0,0 gesetzt.

Wenn auf Grund des Fehlersymptoms (wie in Beispiel aus Abschnitt 4.2.2) die Fehlerursache sowohl in einer Leitungsunterbrechung als auch in einem Kurzschluss liegen kann, müssen beide Arten von Prüfungen generiert werden. Bei der Auswertung der Prüfergebnisse (Abschnitt 5.7.1) muss in diesem Fall berücksichtigt werden, dass beide Arten von Prüfungen für einen Fehlerkandidaten ein *i. O.* liefern müssen, um das Bauteil als fehlerfrei zu klassifizieren.

5.6 Überprüfung elektrischer Bauteile

Mit Hilfe der vorgestellten Prüfgeneratoren lassen sich Prüfungen für einfache elektrische Bauteile generieren. Zu einfachen elektrischen Bauteilen gehören vor allem Leitungen, Stecker, Verschraubungen und Sicherungen. Um ein derartiges Bauteil zu überprüfen, wird eine Prüfanweisung wie: „Überprüfen Sie Sicherung 27“ oder „Überprüfen Sie den Stecker am Luftmassenmesser“ ausgegeben. Ein Mechaniker weiß dann genau, was er tun muss, um festzustellen, ob das besagte Bauteil in Ordnung ist oder nicht. Wenn jedoch komplexe Bauteile, wie Steuergeräte, Sensoren oder Aktoren als möglicher Fehlerkandidat identifiziert wurden, ist eine Überprüfung für den Mechaniker oft nicht so einfach möglich. In diesem Abschnitt werden

drei Verfahren beschrieben, mit denen das Diagnosesystem den Mechaniker bei der Überprüfung komplexer elektrischer Bauteile unterstützen kann. Wenn das Diagnosesystem keines dieser drei Verfahren anwenden kann, um eine Aussage über den Zustand des Bauteils zu erlangen, kann immer noch eine Anweisung wie:

Überprüfen Sie das Bauteil Luftmassenmesser! Können Sie einen Fehler feststellen?

ausgeben werden. Der Mechaniker muss sich dann im Zweifelsfall entsprechende Literatur besorgen, um das Bauteil zu überprüfen.

5.6.1 Messung komplexer Signale

Das im Abschnitt 5.4 vorgestellte Verfahren zum Propagieren von Signalen und Generieren von Spannungsprüfungen kann nicht nur zum Überprüfen der Spannungsversorgung verwendet werden, sondern auch für beliebige andere Signale, die im Fahrzeug vorhanden sind. Ein Beispiel dafür sind Signale auf Datenbussen wie dem CAN-Bus. Sobald mindestens ein Steuergerät Daten auf den Bus sendet, müssen an den Steckern der übrigen Steuergeräte (auch wenn das Steuergerät selbst nicht verbunden ist) CAN-typische Signale gemessen werden können. Die Kundendiensttester (VAS5051A/B) in den VW-Werkstätten haben ein digitales Speicheroszilloskop eingebaut, mit dem überprüft werden kann, ob die Signalformen an den beiden Leitungen des Busses einem gültigen Signal entsprechen. Dadurch können Kurzschlüsse und Leitungsunterbrechungen in den CAN-Leitungen gefunden werden, ohne jeden Leitungsabschnitt einzeln durchzumessen.

Ein anderes Beispiel für eine komplexe Signalprüfung ist die Überprüfung des Signals des Kurbelwellensensors im Motor. Bei drehendem Motor gibt dieser i. d. R. ein drehzahlabhängiges 5V-Rechtecksignal aus – jedoch nur, wenn weder die Spannungsversorgung noch die Masseverbindung gestört sind.

Damit der Prüfgenerator auch in solchen Fällen Prüfungen generieren kann, muss zunächst das entsprechende Signal zusammen mit der Vorbedingung (z. B. bei laufendem Motor) definiert sein. Die Signaldefinition ist nicht fahrzeug-, sondern bauteilabhängig und muss deshalb im Falle eines bestimmten Kurbelwellensensors nur genau einmal für alle Fahrzeuge vorgenommen werden. Bei der Signalpropagierung wird sie in die fahrzeugindividuelle Struktur übernommen und entlang des Kupferpfades verbreitet. Die vorliegende Implementierung des Prüfgenerators verwendet eine natürlichsprachliche Beschreibung der Signale, wie in Tabelle 5.1 in der Spalte Signalbeschreibung angedeutet wird. Es ist jedoch auch vorstellbar, stattdessen einen Datensatz zur Parametrierung eines Messgerätes (z. B. ein Oszilloskop mit Auswertefunktion), das im Diagnosesystem eingebaut oder daran angeschlossen ist, zu hinterlegen. In diesem Fall kann die Messung und Auswertung automatisch erfolgen und der Mechaniker müsste die Messtechnik nur anschließen und die automatische Messung starten.

Die Abbildung 5.7 stellt auf der linken Seite exemplarisch den Anschluss des oben genannten Kurbelwellensensors an das Motorsteuergerät dar. In der Tabelle 5.2 sind die Signale und Pins sowohl des Sensors als auch des Steuergeräts beschrieben. Wenn der Sensorstecker abgezogen wird, kann an den Pins 1 und 3 (wie in den letzten Abschnitten beschrieben) eine Versorgungsspannungs- und Masseprüfung durchgeführt werden. Das drehzahlabhängige Rechtecksignal zur Überprüfung des Sensors kann bei abgezogenem Stecker jedoch weder am Stecker noch am Sensor gemessen werden. Dafür ist es notwendig, dass ein Messadapter (Y-Kabel) wie in Abbildung 5.7 rechts oben zwischen den Sensor und Sensorstecker gesteckt wird. Dadurch wird der Sensor während der Messung mit Spannung versorgt und kann (wenn er in Ordnung ist) das beschriebene Rechtecksignal ausgeben.

Die Notwendigkeit eines Messadapters erkennt das Diagnosesystem auf Grund von Informationen über bauteilspezifische Signalabhängigkeiten. Signalabhängigkeiten wurden bereits im Abschnitt

Pin	Eingang / Ausgang	Signalbeschreibung	Bedingung	Abhängigkeit von Eingängen	Strom KI15 ein	Strom KI15 aus
Sensor						
1	Eingang	Versorgungssp. 5V			15...30mA	0mA
2	Ausgang	Rechteck 5V (drehzahlabhängig)	Motor dreht (z. B. Anlasser)	Pin1, Pin3		
3	Eingang	GND			15...30mA	0mA
Steuergerät						
1	Eingang	Versorgungssp. KI 30			1000...3000mA	5...15mA
5	Eingang	Versorgungssp. KI 15			100...500mA	0mA
10	Ausgang	Sensorversorgung 5V	KI 15 ein	Pin1, Pin5, Pin20		
15	Eingang	Rechteck 5V (drehzahlabhängig)				
20	Eingang	GND			1100...3500mA	5...15mA

Tabelle 5.2.: Bauteilspezifische Informationen bzgl. Signalbeschreibungen und Abhängigkeiten

5.4.1 beim Propagieren über Sicherungen hinweg beschrieben. Bei komplexen Bauteilen müssen diese Informationen zusammen mit den Signalbeschreibungen im Diagnosesystem hinterlegt sein. Aus der Tabelle 5.2 ist ersichtlich, dass der Ausgang (Pin 2) des Sensors abhängig von den Pins 1 und 3 ist. Da ein Abziehen des Steckers die Pins 1 und 3 unterbrechen würde, kann das Diagnosesystem auf die Notwendigkeit eines Prüfadapters schließen.

Vertragswerkstätten der Volkswagen AG sind angehalten, eine Mindestausstattung an Mess- und Prüftechnik vorzuhalten. Dazu gehört auch ein Set von Prüfadaptern für bestimmte häufig verwendete Steckertypen. Wenn dem Diagnosesystem bekannt ist, für welche Stecker (anhand der Teilenummern) Prüfadapter vorliegen, können Signalprüfungen für komplexe Signale generiert und mit Nennung der notwendigen Prüfadapter ausgegeben werden. Für das oben genannte Beispiel sind dem Diagnosesystem z.B. die beiden auf der rechten Seite der Abbildung 5.7 dargestellten Adapter bekannt. Dadurch können zwei Signalprüfungen für das drehzahlabhängige Rechtecksignal generiert werden.

5.6.2 Messung von Strömen

Neben Spannungsmessungen und Durchgangsprüfungen können auch Strommessungen zur Fehlersuche eingesetzt werden. Sie können für Ruhestrommessungen⁷ und die Überprüfung von Bauteilen verwendet werden. Um eine Strommessung zu generieren, muss das Diagnosesystem

⁷Messung des Stromverbrauchs bei abgestelltem Fahrzeug

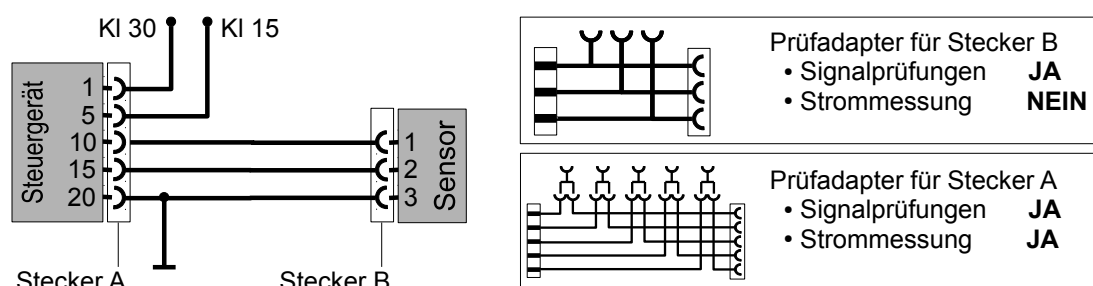


Abbildung 5.7.: Messadapter zur Überprüfung von Signalen und Strömen (exemplarisch)

zunächst den zulässigen Wertebereich kennen. Das sind bauteilspezifische Informationen, die genau wie die Sinalabhängigkeiten in einer elektronischen Bauteilbeschreibung hinterlegt werden müssen. In der Tabelle 5.2 ist z.B. angegeben, dass der Sensor aus dem letzten Abschnitt bei eingeschalteter Zündung einen Stromverbrauch zwischen 15mA und 30mA hat. Das bedeutet: Wenn bei intakter Stromversorgung nicht mindestens 15mA über die Pins 1 und 3 fließen, muss von einem Defekt des Sensors ausgegangen werden.

Eine Strommessung kann nur erzeugt werden, wenn im entsprechenden Kupferpfad zuvor ein Signal (z.B. die Spannungsversorgung) propagiert wurde. Der Algorithmus zum Generieren von Strommessungen wird aktiviert, sobald für einen Anschluss einer Komponente ein zulässiger Strombereich angegeben ist. Ausgehend von diesem Anschluss wird entgegen der Richtung, in die das dazugehörige Signal propagiert wurde, ein Messpunkt gesucht. Ein Messpunkt ist in diesem Fall eine Steckverbindung, für die ein Prüfadapter existiert, der eine Strommessung erlaubt. In der Abbildung 5.7 unterstützt der Prüfadapter für den Stecker A eine solche Messung. Die meisten Adapter in den Werkstätten unterstützen keine Strommessungen. Für das Motorsteuergerät gibt es jedoch z.B. eine Prüf-Box, welche über Brückenstecker verfügt, so dass jede Verbindung aufgetrennt und ein Strommesser zwischengeschaltet werden kann.

Neben der Messung an Steckern ist es vielfach auch sinnvoll, über einer Sicherung zu messen. Mit dieser Methode kann mit einem einzigen Prüfadapter der Strom in fast allen Stromkreisen eines Fahrzeugs gemessen werden. Die Schwierigkeit besteht jedoch darin, dass vielfach mehrere Bauteile an einer gemeinsamen Sicherung angeschlossen sind. Dem Diagnosesystem ist auf Grund der Strukturdaten bekannt, welche Bauteile dies sind. Um den zulässigen Grenzwert zu berechnen, muss das Diagnosesystem von allen an die Sicherung angeschlossen Komponenten den Stromverbrauch kennen.

5.6.3 Manuell erstellte Fehlersuchprogramme

In einigen Fällen reichen die beschriebenen Verfahren nicht aus, um eine spezielle Komponente zu überprüfen. In solchen Fällen muss komponentenspezifisches Expertenwissen angewendet werden. Zur Überprüfung eines Sensors kann es unter Umständen notwendig sein, diesen auszubauen, an ein Messgerät anzuschließen und ihn mit den entsprechenden Messgrößen wie Druck oder Temperatur zu beaufschlagen. Einige Aktoren lassen sich eventuell durch Beobachtung im aktivierten Zustand überprüfen. Beispiele dafür sind das Drehen eines Stellmotors oder das Klacken eines Magnetventils. Damit ein Diagnosesystem Prüfanweisungen für solche Komponenten ausgeben kann, müssen diese im Einzelfall von einem Experten manuell erstellt und dem Diagnosesystem zur Verfügung gestellt werden.

Manuell erstellte Prüfanweisungen kommen bereits heute in der GFS (vgl. Abschnitt 2.1.3) zum Einsatz. Dort werden komplette Prüfabläufe für bestimmte Fehlerbilder in einem Fehlersuchprogramm zusammengefasst. Ein solches Fehlersuchprogramm ist wie ein Entscheidungsbaum aufgebaut und kann viele Einzelprüfungen enthalten. Die einzelnen Prüfanweisungen können beliebige Informationen in Form von Texten und Abbildungen enthalten. Es ist auch möglich, aus diesen Prüfungen heraus Messwertblöcke aus den Steuergeräten auszulesen, Stellgliedtests durchzuführen sowie Spannungs-, Strom- und Widerstandsmessungen mit der im Kundendiensttester eingebauten Messtechnik durchzuführen.

Es ist vorgesehen, diese Art von Prüfungen weiterhin für die Überprüfung bestimmter komplexer Bauteile zu verwenden. Die manuell erstellten Prüfungen können jedoch einfacher ausfallen, als dies für die heutige GFS notwendig ist, da lediglich das Bauteil selbst und nicht die Stromversorgung sowie die Verbindungen zu anderen Bauteilen überprüft werden müssen. Für einfache Bauteile oder Bauteile, für die keine manuell erstellte Prüfsequenz hinterlegt ist, wird dann weiterhin eine allgemeine Anweisung ausgegeben, wie:

Überprüfen Sie Bauteil XYZ! Können Sie einen Fehler feststellen?

5.7 Einsatz im Diagnosesystem

Die beschriebenen Verfahren zur Generierung von Prüfungen wurden mit dem Ziel entwickelt, zusammen mit der wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung eingesetzt zu werden. Aus diesem Grund sind die Anforderungen an die Systeme stark aufeinander abgestimmt. Zu den Eingangsgrößen für die Prüfgeneratoren gehört neben der Beschreibung der Fahrzeugelektrik die ermittelte Fehlerkandidatenliste. Das Ergebnis der durchgeführten Prüfungen ist jeweils eine Aussage über den Fehlerzustand von Komponenten. Diese Information kann für eine Aktualisierung der Fehlerkandidatenliste verwendet werden. Dadurch berücksichtigen die im nächsten Schritt generierten Prüfungen die Ergebnisse aller bereits durchgeführten Prüfungen. Dieses Verhalten wirkt sich sehr vorteilhaft auf die Zielführung des Diagnosesystems aus und ist in dieser Form in Diagnosesystemen wie der GFS, welche Fehlersuchbäume verwenden, nicht möglich.

Die von den einzelnen Prüfgeneratoren erzeugten Prüfungen werden an den dynamischen Prüfablauf übergeben und von ihm verwaltet. Der dynamische Prüfablauf wird im Kapitel 6 beschrieben. Seine Aufgabe besteht darin, aus der Menge der generierten Prüfungen zum jeweiligen Zeitpunkt die beste Prüfung auszuwählen und dem Mechaniker anzuzeigen.

5.7.1 Auswertung der Prüfergebnisse

Nachdem die Prüfung durchgeführt wurde und der Mechaniker das Ergebnis in das Diagnosesystem eingegeben hat, wird dieses an das Auswertemodul übergeben. Jede Prüfung enthält eine Liste mit allen Komponenten, die durch sie überprüft wurden. Darüber hinaus ist abgelegt, welches Ergebnis (*pass* oder *fail*) der Mechaniker in den Prüfdialog eingegeben hat.

Wenn eine Prüfung ein positives Ergebnis erzielt hat, werden die Fehlerkandidaten entlastet. Wird ein bestimmtes Bauteil im Bezug auf die zu überprüfenden Eigenschaften als fehlerfrei klassifiziert, wird die Fehlerwahrscheinlichkeit in Form einer harten Evidenz (vgl. Abschnitt 4.7.2) auf 0,0 festgesetzt. Wenn z.B. ein bestimmter Leitungsabschnitt bzgl. einer Unterbrechung untersucht werden soll und die entsprechende Durchgangsprüfung das Ergebnis *pass* liefert, werden alle enthaltenen Komponenten als fehlerfrei angesehen. Wenn jedoch, wie im Beispiel aus Abschnitt 5.5, ein Leitungsabschnitt sowohl bzgl. Unterbrechungen als auch bzgl. Kurzschluss gegen Masse oder Versorgungsspannung untersucht werden muss, erfolgt eine vollständige Entlastung erst, wenn für alle notwendigen Prüfungen das Ergebnis *pass* vorliegt. Stehen bestimmte Prüfungen noch aus, erfolgt lediglich eine anteilige Entlastung.

Wird im Zusammenhang mit einer Leitungsprüfung ein mehrpoliger Stecker geprüft, wird dieser, wenn die Prüfung *pass* liefert, nicht entlastet. Diese Ausnahme ist notwendig, da durch die Prüfung i. d. R. nur ein Kontakt geprüft wurde und über die anderen Kontakte keine Aussage getroffen werden kann. Es werden jedoch immer parallel Komponentenprüfungen für die Stecker generiert. Diese weisen den Mechaniker an, den Stecker auf eventuelle Beschädigungen hin zu untersuchen. Das Ergebnis dieser Prüfung entlastet den Stecker vollständig.

Wenn eine Prüfung ein negatives Ergebnis liefert, bedeutet dies, dass mindestens eine der überprüften Komponenten defekt ist. In diesem Fall werden alle überprüften Komponenten anteilig belastet (vgl. Abschnitt 4.7.2).

5.7.2 Aktualisierung der Prüfungen

Nachdem eine Prüfung durchgeführt wurde, wird die Fehlerkandidatenliste aktualisiert. Daraufhin müssen auch die Prüfungen aktualisiert werden. Wenn bereits Prüfungen für Komponenten existieren, die nicht mehr in der Fehlerkandidatenliste enthalten sind, werden diese entfernt. Existieren in der Fehlerkandidatenliste Bauteile, für die bisher noch keine Prüfungen vorhanden sind, werden dafür die entsprechenden Prüfgeneratoren angestoßen.

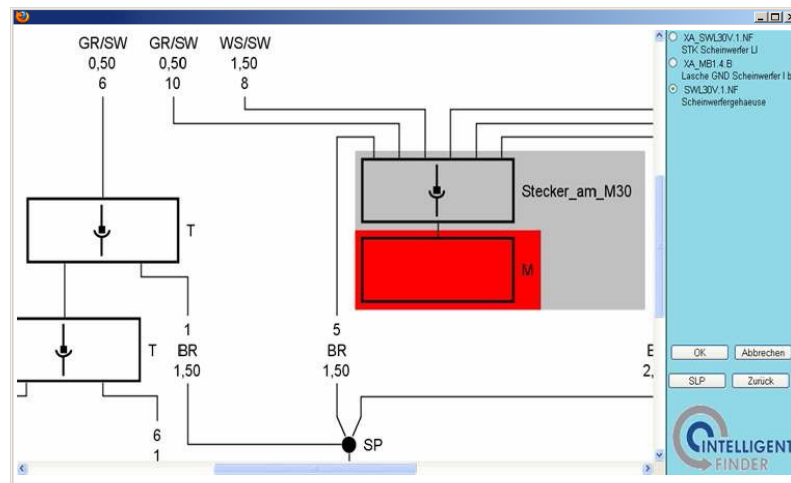


Abbildung 5.8.: Exemplarische Darstellung eines Stromlaufplanausschnittes beim Diagnosesystem Intelligent Finder

5.7.3 Darstellung von Zusatzinformationen

Zu jeder Komponente können Zusatzinformationen hinterlegt und ausgegeben werden. Die Verknüpfung erfolgt automatisch über die eindeutigen Teilenummern der Komponente. In der Abbildung 5.1 wird z. B. eine Abbildung des Steckers, an dem eine Messung durchgeführt werden soll, mit Bezeichnung der Pins angezeigt. Bei der Generierung der Prüfanweisung wird automatisch überprüft, ob Zusatzinformationen hinterlegt sind, die zur Unterstützung des Mechanikers ausgegeben werden können. Dies ist vor allem für Stecker (Abbildung mit Steckerbelegung), Sicherungshalter (Abbildung mit Benennung der Sicherungen), elektrische Bauteile (mit Angabe von Verbauort und Steckerbezeichnung, wenn mehrere vorhanden), sowie bei Messadaptern sinnvoll.

Bei der Erklärung der strukturbeschreibenden Daten im Abschnitt 4.2.1 wurde bereits erwähnt, dass es möglich ist, aus diesem Datensatz jederzeit einen vollständigen, fahrzeugindividuellen Stromlaufplan zu generieren. Sinnvoller als ein vollständiger Stromlaufplan ist es jedoch, gezielt einen bestimmten Ausschnitt aus dem Stromlaufplan zu generieren und auf Wunsch des Mechanikers anzuzeigen. Ein sinnvoller Ausschnitt entsteht, indem für die Generierung des Stromlaufplans nur die Wirkketten verwendet werden, die potentielle Fehlerkandidaten enthalten. Wenn ein bestimmter Sensor potentieller Fehlerkandidat ist, kann dadurch z. B. ein Stromlaufplan generiert werden, der alle Verbindungen des Sensors mit dem dazugehörigen Steuergerät sowie die Spannungsversorgung und die Masseverbindung enthält. Das Diagnosesystem Intelligent Finder (vgl. Kapitel 4) enthält eine derartige Funktion. Die Abbildung 5.8 stellt einen Screenshot dieses Systems dar. Im Zusammenhang mit den generierten Messungen können in einem solchen Stromlaufplan der geprüfte Pfad und somit alle überprüften Komponenten farbig hervorgehoben werden. Die automatische Erzeugung eines gut lesbaren Stromlaufplans aus den Strukturdaten ist nicht Bestandteil dieser Arbeit, da es dafür bereits fertige Lösungen gibt. Ein sinnvoll gewählter Ausschnitt aus dem Stromlaufplan in gut lesbarer Form kann den Mechaniker beim Verständnis des vorliegenden Problems und bei dessen Beseitigung unterstützen und ist eine sinnvolle Ergänzung zu dem hier beschriebenen Diagnosesystem.

5.8 Test der Prüfgeneratoren

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, ob die beschriebenen Verfahren zur Generierung von Prüfschritten geeignet sind, um das im Abschnitt 3.2 beschriebene Problem und die daraus abgeleiteten Anforderungen (Abschnitt 5.1) zu erfüllen bzw. zu lösen. Zu diesem Zweck wurden die Prüfgeneratoren in Software umgesetzt und in ein modulares Diagnosesystem integriert.

Prüfungen	Abdeckung der Anforderungen												
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
A.2.1 Test der Grundfunktion	×	×	×	×	×						×		
A.2.2 Signalprüfungen						×	×	×	×		×		
A.2.3 Komplexes Fehlerbild											×	×	×
A.2.4 Einfluss der Signaldefinitionen										×			

Tabelle 5.3.: Abdeckung der Anforderungen (Abschnitt 5.1) durch Prüfungen (Anhang A.2)

Ausgehend von den Anforderungen wurden vier Testfälle (A.2.1 bis A.2.4) entwickelt. Die Testfälle sind gleichermaßen strukturiert, wie die Testfälle aus Abschnitt 4.8.

Die detaillierte Beschreibung der Testfälle ist im Anhang (ab Seite 150) abgedruckt. Im Folgenden erfolgt lediglich eine Zusammenfassung der Testfälle und Ergebnisse. Die Tabelle 5.3 stellt dar, welche Anforderungen aus Abschnitt 5.1 durch die Prüfungen (Abschnitt A.2.1 bis A.2.4) abgedeckt werden. Bei den einzelnen Prüfungen kann dadurch auf die Beschreibung der Anforderungsabdeckung verzichtet werden.

Test der Grundfunktionen

Im Test A.2.1 ab Seite 150 werden für ein konkretes elektrisches Teilsystem eines Fahrzeugs Durchgangsprüfungen generiert. Dafür werden dem Prüfgenerator unterschiedliche Fehlerkandidaten sowie die Strukturbeschreibung eines realen Fahrzeugs übergeben. Die Menge der generierten Prüfungen wird bezüglich Vollständigkeit und Korrektheit überprüft. Die Bildschirmausgabe einer Prüfung wird exemplarisch dargestellt. Des Weiteren wird überprüft, ob die Menge der überprüften Komponenten jeder einzelnen Prüfung stimmt.

Die Menge der generierten Prüfungen ist korrekt und vollständig. Die Menge der überprüften Komponenten zu jeder Prüfung wird richtig ermittelt. Die ausgegebene Prüfanweisung (Screenshot S.152) ist verständlich. Der Test wird als bestanden bewertet.

Signalprüfungen

Bei diesem Testfall (A.2.2 ab Seite 152) wird das Verhalten der Prüfgeneratoren bei der Generierung von Signalprüfungen untersucht. Zu diesem Zweck steht dem Prüfgenerator zusätzlich zu den Fehlerkandidaten und der Strukturbeschreibung einen Datensatz mit Signalbeschreibungen zur Verfügung. Es werden Prüfungen für drei mögliche Fehlerfälle (Leitungsunterbrechungen) generiert. Dabei werden neben einfachen Signalprüfungen auch Masseverbindungen geprüft, wobei die im Abschnitt 5.4.3 beschriebenen Besonderheiten berücksichtigt werden müssen.

Es wurde jeweils die korrekte Menge an Prüfungen generiert. Auch die Menge der jeweils überprüften Komponenten war in allen Fällen korrekt. Der Test wird als bestanden bewertet.

Komplexes Fehlerbild

Für bestimmte elektrische Komponenten lassen sich u.U. sehr viele Prüfungen generieren. Mit dem Test A.2.3 ab Seite 154 soll die Fähigkeit, jeweils nur eine sinnvolle Menge an Prüfungen zu generieren, überprüft werden. Des Weiteren wird mit diesem Testfall überprüft, ob beim Auftrennen von Steckverbindungen die richtige Seite als Messpunkt angegeben wird.

Das beobachtete Verhalten entspricht den Anforderungen. Der Test wird als bestanden bewertet.

Einfluss der Signaldefinitionen

Mit dem Test A.2.4 auf Seite 156 soll der Nachweis erbracht werden, dass für die Generierung von Signalprüfungen nur ein sehr geringes Maß von Expertenwissen notwendig ist. Es soll der Einfluss

der Anzahl der Signaldefinitionen auf die Menge der generierbaren Prüfungen untersucht werden. Neben einfach zu messenden Signalen, wie Spannungsversorgungen und Masseverbindungen gibt es auch Signale, die wesentlich schwieriger zu überprüfen sind. Dazu gehören z. B. Steuersignale von Sensoren und Aktoren. Im Allgemeinen können Signalprüfungen jedoch den Prüfaufwand signifikant reduzieren, da im Vergleich zu einer Durchgangsprüfung nur ein Messpunkt freigelegt werden muss. Ziel ist es daher, mit möglichst wenigen Signaldefinitionen einen möglichst großen Teil des Bordnetzes mit automatisch generierten Signalprüfungen überprüfen zu können.

Allein das Wissen darüber, dass an den Massepunkten Massepotential und an den Sicherungen Versorgungsspannung anliegt, reicht aus um 191 Prüfungen oder fast 22% des Bordnetzes mit Hilfe von Signalprüfungen zu überprüfen. Durch wenige zusätzliche Signalbeschreibungen, wie CAN-Datenbusse und Leitungen zur Ansteuerung der Fahrzeugbeleuchtung, können insgesamt 312 Prüfungen oder 35,8% des Bordnetzes abgedeckt werden. Da diese Art von Expertenwissen vielfach unverändert für andere Fahrzeugprojekte wiederverwendet werden kann, kann der Aufwand für die Erstellung und Pflege dieser Wissensbasis als minimal angesehen werden. Die Prüfung wird als bestanden bewertet.

5.9 Zusammenfassung Kapitel 5

In diesem Kapitel wurde die Entwicklung von Verfahren zur automatischen Generierung von Prüfungen für elektrische Bordnetzkomponenten beschrieben. Es wurden Prüfgeneratoren für verschiedene Arten von Prüfungen entwickelt. Die Prüfgeneratoren bekommen als Eingangsgrößen einen Datensatz mit der fahrzeugindividuellen elektrischen Strukturbeschreibung sowie eine Liste mit möglichen Fehlerkandidaten. Letztere kann z. B. die Ausgabe der wahrheitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung sein. Es werden Bildschirmdialoge mit Prüfanweisungen generiert, die zum Freilegen entsprechender Messpunkte sowie zur Messung elektrischer Größen (Widerstand, Spannung, Strom) auffordern. Mithilfe des Ergebnisses der Prüfungen kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob bestimmte Komponenten tatsächlich defekt sind oder zu Unrecht verdächtigt wurden.

Da den Prüfungen eine exakte Beschreibung des Bordnetzes mit allen variantenspezifischen Besonderheiten zugrunde liegt, besitzen die Prüfanweisungen einen sehr hohen Detaillierungsgrad. Die Prüfgeneratoren kennen jede einzelne Leitung im Bordnetz und jeden Kontakt eines Steckers. Es ist auch möglich, zu jeder Komponente eine Abbildung (z. B. mit Stecker oder Sicherungsbelegungen) einzublenden. Die Diplomarbeit [Sch07] beschreibt die prototypische Implementierung der beschriebenen Algorithmen. Die zugrunde liegenden Verfahren sind zum Patent angemeldet ([KBMS], [KBS]).

Zu Beginn des Kapitels wurden Anforderungen an die Prüfgeneratoren formuliert, die aus der Problemanalyse im Kapitel 3 abgeleitet wurden. Im Anschluss daran wurde die Generierung der Prüfanweisungen in Form von Bildschirmdialogen beschrieben. Der Schwerpunkt des Kapitels lag in der Beschreibung der eigentlichen Prüfgeneratoren für Durchgangsprüfungen, für Spannungs- und Masseprüfungen, zum Auffinden von Kurzschlüssen sowie zur Überprüfung komplexer Bauteile. Zum Ende des Kapitels wurden die Integration der Prüfgeneratoren in ein intelligentes Diagnosesystem sowie verschiedene Tests, die mit einer Implementierung der Prüfgeneratoren durchgeführt wurden, beschrieben.

6. | Dynamischer Prüfablauf

Um die Ursache einer Störung in der Fahrzeugelektrik zu ermitteln, müssen in der Regel mehrere verschiedene Prüfungen durchgeführt werden. Die Auswahl und die Reihenfolge der durchzuführenden Prüfungen haben einen entscheidenden Einfluss auf die Effizienz der Fehlersuche. Durch Vorgabe eines bestimmten Prüfablaufes durch das Diagnosesystem soll der Mechaniker die Fehlerursache schnell und kostengünstig finden. Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte dynamische Prüfablauf bietet gegenüber bestehenden Verfahren mit vordefinierten fixen Prüfabläufen folgende Vorteile:

- Der Prüfablauf wird zur Laufzeit aus einer vorher nicht bekannten Menge von Prüfungen ermittelt.
- Die Fehlerwahrscheinlichkeit der überprüften Komponenten sowie der Aufwand der Prüfungen wird bei der Reihenfolge der Prüfungen berücksichtigt.
- Die Festlegung der Reihenfolge der Prüfungen erfolgt durch Berechnungen d.h. ohne menschliches Zutun.
- Der Anwender kann den Prüfablauf beeinflussen, z. B. wenn bereits ein konkreter Verdacht besteht.

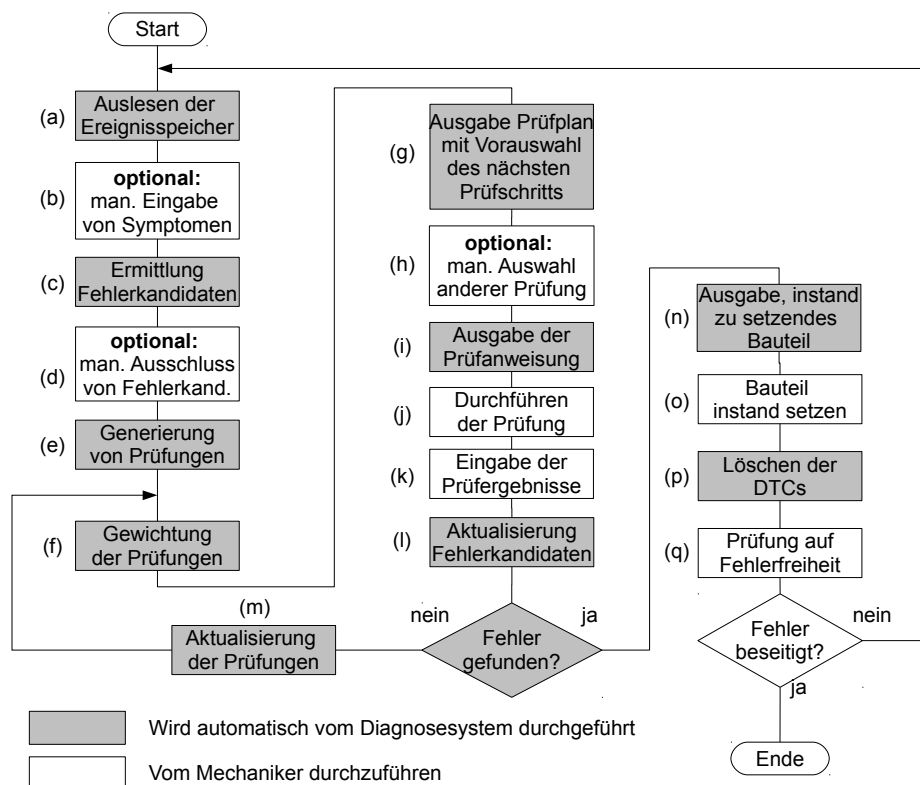


Abbildung 6.1.: Ablaufdiagramm: Fehlersuche und Instandsetzung eines Einzelfehlers mit Hilfe des beschriebenen Systems

Die Abbildung 6.1 stellt den übergeordneten Ablauf für die Fehlersuche und Instandsetzung mit dem neu entwickelten Diagnosesystem dar. Die grau hinterlegten Aktivitäten in der Abbildung werden automatisch vom Diagnosesystem durchgeführt, während die weißen Elemente vom Mechaniker ausgeführt werden müssen, bzw. optional sind.

Zu Beginn der Fehlersuche erfolgt die Ermittlung von Fehlerkandidaten und möglichen Prüfungen. Dazu wird zunächst das Diagnosesystem an das Fahrzeug angeschlossen und es werden die Ereignisspeicher aus allen Steuergeräten ausgelesen (a). Anschließend kann sich der Mechaniker die erkannten Fehlersymptome ansehen und weitere Symptome (b) eingeben. Mit Hilfe des im Kapitel 4 beschriebenen Verfahrens werden daraufhin die wahrscheinlichen Fehlerkandidaten ermittelt und in die gewichtete Fehlerkandidatenliste (c) eingetragen. Im nächsten Schritt besteht die Möglichkeit, einzelne Fehlerkandidaten (die z. B. bereits geprüft wurden) manuell aus der Liste auszuschließen (d).

Auf Basis der Fehlerkandidatenliste werden dann, wie im Kapitel 5 erläutert, automatisch sinnvolle Prüfungen generiert (e) und in einem Prüfplan abgelegt. Als nächstes erfolgt die Gewichtung der Prüfungen innerhalb des Prüfplans (f). Die Prüfung, die in der aktuellen Situation am sinnvollsten erscheint, steht danach im Prüfplan an erster Stelle. Die für die Gewichtung verwendeten Kriterien und Verfahren sind Inhalt dieses Kapitels. Danach wird der gewichtete Prüfplan mit einer empfohlenen Prüfung ausgegeben (g). Der Mechaniker kann diese Empfehlung annehmen oder eine andere Prüfung aus dem Prüfplan auswählen (h). Das Diagnosesystem gibt die Prüfung, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, in Form einer Prüfanweisung aus (i).

Nachdem der Mechaniker die Prüfung durchgeführt hat (j), gibt er das Ergebnis zur weiteren Bewertung in das System ein (k). Wenn durch die Prüfung zuvor verdächtige Bauteile als fehlerfrei identifiziert werden, so tauchen sie nach der nun folgenden Aktualisierung der Fehlerkandidatenliste (l) nicht mehr darin auf. Bei der Aktualisierung der Prüfungen (m) werden die Bauteile daraufhin ebenfalls nicht mehr berücksichtigt. Viele Prüfungen, z. B. Durchgangsprüfungen, überprüfen mehrere Bauteile. Wenn eine Prüfung ein negatives Ergebnis liefert, bedeutet dies, dass eines der enthaltenen Bauteile defekt ist. Nach der Aktualisierung der Fehlerkandidatenliste bekommen die betroffenen Bauteile deshalb eine höhere Fehlerwahrscheinlichkeit gegenüber den übrigen Kandidaten. Dies hat wiederum Auswirkungen auf die Gewichtung der folgenden Prüfungen.

Wenn ein konkretes Bauteil als fehlerhaft identifiziert wurde, so wird dies über die Benutzerschnittstelle ausgegeben (n), damit der Mechaniker es instandsetzen kann¹ (o). Im Anschluss an die Reparatur werden die Ereignisspeichereinträge aus den betroffenen Steuergeräten gelöscht (p) und der Mechaniker überprüft das Fahrzeug bzw. das betroffene Fahrzeugsystem auf korrekte Funktion (q). Sollten dann immer noch Fehler vorhanden sein, beginnt der Diagnose- und Reparaturvorgang von Neuem. Andernfalls ist die Reparatur abgeschlossen.

Die Herausforderung bei einem intelligenten Diagnosesystem besteht darin, jeweils automatisch die beste der verfügbaren Prüfungen auszuwählen. Das vorliegende Kapitel beschreibt Verfahren, mit denen eine möglichst gute Auswahl getroffen werden kann. Am Ende des Kapitels wird die Leistungsfähigkeit der Verfahren mit ausgewählten Tests gezeigt.

Definition Beste Prüfung: Die beste Prüfung ist die Prüfung, die zum Auswahlzeitpunkt das größte Potenzial hat, die Fehlerursache zu identifizieren oder alternative Fehlerquellen auszuschließen und dabei mit einem möglichst geringen Aufwand verbunden ist.

Definition Optimaler Prüfablauf: Der optimale Prüfablauf ist eine Sequenz von Prüfungen, durch welche die Ursache des Fehlers mit dem geringstmöglichen Aufwand gefunden werden kann. Der Abschnitt 6.1 zeigt, dass dieses Optimum nur

¹Reparaturhandlungen werden im Rahmen der Arbeit nicht berücksichtigt. Ziel ist die Identifizierung des fehlerverursachenden Bauteils.

näherungsweise gefunden werden kann, indem jeweils die beste Prüfung ausgewählt wird.

Nachdem im Abschnitt 6.1 auf das Prüfsequenzproblem eingegangen wird, werden im Abschnitt 6.2 die Anforderungen an den dynamischen Prüfplan definiert. In den Abschnitten 6.3 und 6.4 werden Methoden zur Ermittlung der besten Prüfung beschrieben. Im Abschnitt 6.5 wird die Funktion des dynamischen Prüfplans und die Integration in das Diagnosesystem beschrieben. Am Ende des Kapitels wird im Abschnitt 6.6 gezeigt, dass sich mit den beschriebenen Verfahren die gestellten Anforderungen erfüllen lassen.

6.1 Das Prüfsequenzproblem

Um die Ursache für einen Fehler in einem komplexen System zu finden, müssen i. d. R. mehrere Prüfungen durchgeführt werden. Um eine möglichst effiziente Fehlersuche zu ermöglichen, ist es deshalb besonders wichtig, eine möglichst gute Prüfsequenz (Auswahl und Reihenfolge der einzelnen Prüfungen) zu ermitteln.

Das zugrundeliegende Problem – das Finden einer optimalen Prüfsequenz – ist in der Literatur als „Test Sequencing Problem“ bekannt. In [HR76] wurde gezeigt, dass für das Problem immer eine Lösung existiert, sie jedoch nur für überschaubar kleine Probleme mit akzeptablem Aufwand gefunden werden kann. In [PA90] und [RPS99] wurden Algorithmen vorgestellt, die eine Speicher- und Berechnungskomplexität von $O(3^n)$ besitzen, wobei n die Anzahl der Prüfungen ist. Laut [RTPPH04] können damit Lösungen gefunden werden, solange weniger als 12 Prüfungen zur Auswahl stehen. Diese Art von Algorithmen sind demnach für den Einsatz in interaktiven Diagnosesystemen, die darüber hinaus wesentlich mehr als 12 Prüfungen unterstützen sollen, nicht geeignet. In [Vom07] ist dieser Zusammenhang ausführlich beschrieben.

Für die meisten realen Probleme ist es nicht notwendig, die beste Prüfsequenz zu ermitteln, sondern es reicht aus, eine möglichst gute Sequenz zu finden. Dies entspricht der Suche nach einem lokalen Maximum im mathematischen Sinn. Das in diesem Kapitel beschriebene Verfahren gehört in diese Kategorie. In einem iterativen Prozess wird dabei jeweils die beste der zur Verfügung stehenden Prüfungen ausgewählt. Nachdem diese ausgeführt wurde und das Ergebnis bekannt ist, wird auf Grund der neuen Erkenntnisse die nächste Prüfung ausgewählt. Durch dieses Vorgehen wird die Fehlerursache sukzessiv eingegrenzt. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass eine andere Prüfsequenz existiert, welche die Fehlerursache effizienter gefunden hätte. Dies ist ein übliches Vorgehen zur Lösung dieser Art von Problemen.

6.2 Anforderungen an den dynamischen Prüfablauf

Im Abschnitt 3.3 wurde zur Lösung des analysierten Problems ein Verfahren für einen dynamischen Prüfablauf gefordert. Dieser dynamische Prüfablauf soll keine vorher festgelegte Sequenz von Prüfungen abarbeiten, sondern anhand von zur Laufzeit berechneten Einflussfaktoren selbständig entscheiden, welche der vorliegenden Prüfungen in der jeweiligen Situation die beste ist. Daraus ergeben sich folgende Anforderungen:

- /32/ Es soll ein Prüfablauf aus vorgegebenen Prüfungen zur Eingrenzung der Fehlerursache generiert werden.
⇒ Umsetzung: S. 94 ff. Validation: S. 166 ff.
- /33/ Die zur Verfügung stehenden Prüfungen sollen sinnvoll gewichtet werden.
⇒ Umsetzung: S. 91 ff. Validation: S. 157 ff.
- /34/ Es soll jeweils automatisch die Prüfung mit der höchsten Gewichtung ausgewählt werden.
⇒ Umsetzung: S. 92 ff. Validation: S. 166 ff.

/35/ Für jede Prüfung soll der erwartete Aufwand ermittelt werden und in die Gewichtung der Prüfungen eingehen.

⇒ Umsetzung: S. 87 ff. Validation: S. 157 ff.

/36/ Die Fehlerwahrscheinlichkeiten aller von einer Prüfung überprüften Komponenten sollen in die Gewichtung der Prüfungen eingehen.

⇒ Umsetzung: S. 91 ff. Validation: S. 157 ff.

/37/ Nach jeder durchgeführten Prüfung soll das Ergebnis ausgewertet werden, um:

- die Fehlerkandidatenliste zu aktualisieren,
- die Liste der Prüfungen zu aktualisieren und
- die Gewichtung der einzelnen Prüfungen zu aktualisieren.

⇒ Umsetzung: S. 97 ff. Validation: S. 161 ff.

/38/ Liegen mehrere unabhängige Fehler vor, sollen dafür separate Prüfsequenzen erzeugt werden.

⇒ Umsetzung: S. 93 ff. Validation: S. 164 ff.

/39/ Der Anwender soll bei unabhängigen Fehlern auswählen können, welchen der vorliegenden Fehler er zuerst mit dem System suchen möchte.

⇒ Umsetzung: S. 93 ff. Validation: S. 164 ff.

/40/ Der Anwender soll die Prüfungen auch in einer anderen als der vorgeschlagenen Reihenfolge durchführen können.

⇒ Umsetzung: S. 96 ff. Validation: S. 164 ff.

/41/ Der Anwender soll vorgeschlagene Prüfungen überspringen können.

⇒ Umsetzung: S. 96 ff. Validation: S. 164 ff.

/42/ Der Anwender soll bereits durchgeführte oder übersprungene Prüfungen wiederholen können.

⇒ Umsetzung: S. 96 ff. Validation: S. 164 ff.

Aus der Literatur sind bereits Verfahren bekannt, die einen Teil der Anforderungen erfüllen. In [RK07], [HBR95], [SJK00] und [GB01] werden Bayes-Netze verwendet, um Entscheidungen zur Auswahl des nächsten Prüfschritts herbeizuführen. Im Zusammenspiel mit wahrscheinlichkeitsbasierten Verfahren lassen sich auch *Decision Graphs*, eine spezielle Erweiterung der Bayes-Netze (vgl. [Jen01]), verwenden. In [JKK⁺00] wird ein solches Vorgehen beschrieben. In Situationen, in denen sehr viele Prüfungen zur Auswahl stehen, werden Verfahren auf Basis von Bayes-Netzen vielfach zu aufwändig (vgl. [VV03]), so dass die Berechnung zu viel Zeit in Anspruch nehmen würde. Keines der beschriebenen Verfahren deckt alle Anforderungen ab, und lässt sich sinnvoll mit der wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung und den Prüfgeneratoren kombinieren.

6.3 Bewertung der Prüfungen

Die Bewertung der Prüfungen ist notwendig, um das lokale Maximum bzw. die beste der zur Verfügung stehenden Prüfungen auszuwählen. Anschließend sollen die Prüfungen anhand eines numerischen Wertes in absteigender Reihenfolge im Prüfplan sortiert werden. Die beste Prüfung soll an oberster Stelle stehen. Die Philosophie hinter dem dadurch gewichteten Prüfplan ist somit die gleiche wie hinter der gewichteten Fehlerkandidatenliste.

Für die Bewertung der einzelnen Prüfungen stehen folgende Informationen zur Verfügung:

- Die Fehlerkandidatenliste $K = \{k_1, \dots, k_m\}$ ist die Liste der zuvor ermittelten möglichen Fehlerkandidaten. Zu jedem Fehlerkandidaten k_i ist die Fehlerwahrscheinlichkeit $P(k_i = \text{nio})$ bekannt. In der Fehlerkandidatenliste sind bereits die Ergebnisse aller bisher durchgeführten Prüfungen berücksichtigt. Aus diesem Grund ändert sich K nach jeder durchgeführten Prüfung.

- Jeder Fehlerkandidat k_i enthält eine Liste $Sym_{k_i} = \{sym_1, \dots, sym_n\}$ mit Fehlersymptomen, auf Grund deren Existenz k_i in K aufgenommen wurde. Wenn mehrere Fehlersymptome in einem Fahrzeug vorhanden sind, wird vom System zur Fehlerkandidatenermittlung dadurch angegeben, auf Grund welches oder welcher Symptome ein Bauteil verdächtigt wird.
- Die Liste der Prüfungen $T = \{t_1, \dots, t_p\}$ (T für engl. test) enthält alle Prüfungen, die von den Prüfgeneratoren für die Fehlerkandidaten in K erstellt wurden.
- Jede Prüfung t_i enthält eine Liste $K_{ti} = \{k_1, \dots, k_q\}$ mit Komponenten (Bauteilen) die durch diese Prüfung überprüft werden. (Auf Grund der Funktionalität der Prüfgeneratoren muss mindestens ein Element aus K_{ti} auch in K enthalten sein).
- Die Liste mit Prüfzugängen $PZ = \{pz_1, \dots, pz_r\}$ enthält Messpunkte und komplexe Bauteile, die zur Durchführung von Prüfungen ausgebaut oder freigelegt werden müssen. Jedem Prüfzugang ist ein numerischer Wert zugeordnet, der dem notwendigen Aufwand entspricht. Darüber hinaus enthalten die Elemente von PZ Informationen darüber, ob das betreffende Bauteil bereits in einem früheren Schritt freigelegt wurde.
- Jede Prüfung t_i enthält eine Kostenfunktion $C_{ti}(PZ)$, mit deren Hilfe sich der Aufwand zur Durchführung der Prüfung bestimmen lässt. Der Wert der Funktion kann sich im Laufe des Prüfablaufs ändern, sobald ein enthaltener Prüfzugang bei der Durchführung einer anderen Prüfung freigelegt wird.
- Aus jeder Prüfung t_i resultiert ein Befund (engl. finding) $f_{ti} = \{\emptyset, pass, fail\}$ sobald sie durchgeführt wurde. $f_{ti} = \emptyset$ bedeutet, dass die Prüfung noch nicht durchgeführt wurde. Bei $f_{ti} = pass$ wurde kein Fehler und bei $f_{ti} = fail$ wurde mindestens ein Fehler erkannt.
- Die Erkenntnisse, die im Laufe des Prüfablaufs durch die Befunde entstehen, werden als Evidenz ε bezeichnet. Sie enthält Informationen darüber, welche drei Prüfungen durchgeführt wurden und welche Befunde diese ergaben.

6.3.1 Aufwand einer Prüfung

Ein sehr wichtiger Faktor bei der Auswahl der nächsten Prüfungen ist der Aufwand, der bei der Durchführung entsteht. Um z.B. eine Messung durchführen zu können, müssen der oder die Messpunkte zunächst freigelegt werden. In den meisten Fällen ist es dafür notwendig, die entsprechende Verkleidung aus dem Fahrzeug auszubauen, den Stecker von der Komponente oder dem Steuergerät abzuziehen und ihn mit einem Prüfadapter oder einer Messspitze zu verbinden. Nach Abschluss des Reparaturvorgangs muss alles wieder zusammengebaut werden. Der Aufwand, der damit verbunden ist, ist i. d. R. für jeden Messpunkt unterschiedlich und muss dem Diagnosesystem bekannt sein.

Als Maßeinheit für den Aufwand (Auseinanderbauen, Messen, am Ende wieder Zusammenbauen) wird im folgenden ZE für Zeiteinheit verwendet. Eine ZE kann z. B. $1min$ oder $0,01h$ entsprechen. Die Daten können z. B. einem Abrechnungssystem entnommen werden. Der Anspruch, den das Diagnosesystem an die Qualität der Daten stellt, ist allerdings bei weitem nicht so hoch wie bei einem Abrechnungssystem. Das Diagnosesystem muss anhand der Daten lediglich ermitteln können, ob eine Prüfung mit mehr, weniger oder vergleichbar viel Aufwand wie eine andere Prüfung verbunden ist.

In der Liste der Prüfzugänge PZ sind für jede Steckverbindung im Fahrzeug die notwendigen Zeiteinheiten hinterlegt. Im Folgenden werden die Kostenfunktionen $C_{ti}(PZ)$ für die drei häufigsten Arten von Prüfungen beschrieben.

- Spannungsprüfung oder Masseprüfung: $C_{ti}(PZ) = C_{Mp}(PZ) + C_{Messung}$
- Durchgangsprüfung: $C_{ti}(PZ) = C_{Mp1}(PZ) + C_{Mp2}(PZ) + C_{Messung}$
- Komponentenprüfung: $C_{ti}(PZ) = C_{Komponente}(PZ)$

Der Wert von $C_{Messung}$ entspricht dem Aufwand zum Anschließen eines Messgerätes an einen freigelegten Stecker und dem Durchführen der angegebenen Messung. $C_{Mp}(PZ)$ ist eine Funktion, die den Aufwand zum Freilegen des Messpunktes Mp bestimmt. PZ enthält Informationen darüber, ob der Messpunkt bereits in einer früheren Prüfung freigelegt wurde. Ist dies der Fall, ist der Funktionswert von $C_{Mp}(PZ) = 0,0$. Bei einer Durchgangsprüfung müssen zwei Messpunkte freigelegt werden. Ist dies bereits geschehen, reduzieren sich auch hier die Kosten auf die Konstante $C_{Messung}$. Der Aufwand einer Komponentenprüfung kann nicht berechnet werden und muss deshalb in PZ hinterlegt sein.

6.3.2 Kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit

Um die nächste Prüfung auswählen zu können, reicht es nicht aus, nur den damit verbundenen Aufwand zu kennen. Es muss auch ermittelt werden können, wie hoch der Beitrag einer Prüfung zur Ermittlung der Fehlerursache ist.

Jede Prüfung prüft einen oder mehrere potentielle Fehlerkandidaten ab. Es erscheint sinnvoll, die Prüfung auszuwählen, welche die Fehlerkandidaten mit der höchsten Fehlerwahrscheinlichkeit prüft. Für jede Prüfung, die noch nicht durchgeführt wurde ($f_{ii} = \emptyset$), lässt sich die kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit $P(f_{ii} = fail)$ berechnen. Sie setzt sich aus den Fehlerwahrscheinlichkeiten aller enthaltenen Bauteile $P(k_i = nio)$ zusammen und gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass mindestens eines der Bauteile defekt ist.

Es wird davon ausgegangen, dass eine Prüfung das Ergebnis $f_{ii} = fail$ liefert, sobald eines der überprüften Bauteile defekt ist. Bei einer Durchgangsprüfung, die eine Reihenschaltung von mehreren Leitungsabschnitten und Steckern prüft, ist diese Forderung erfüllt. Aber auch alle anderen Prüfungen dürfen nur dann ein positives Ergebnis ($f_{ii} = pass$) liefern, wenn alle Bauteile in Ordnung sind. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Prüfung von n Bauteilen ein positives Ergebnis liefert, lässt sich mit Hilfe der Verbundwahrscheinlichkeit (vgl. Abschnitt 2.2.1) gemäß Formel 6.1 berechnen.

$$P(f_{ii} = pass|K) = P(f_{ii} = pass|k_1, k_2, \dots, k_n) = P(k_1 = io \cap k_2 = io \cap \dots \cap k_n = io) \quad (6.1)$$

Unter der Annahme einer vollständigen stochastischen Unabhängigkeit², kann der Ausdruck durch Anwendung der Formeln 2.3 und 2.6 zur Formel 6.2 vereinfacht werden:

$$P(f_{ii} = pass|K) = P(k_1 = io) \cdot P(k_2 = io) \cdots P(k_n = io) \quad (6.2)$$

Dafür muss für jedes Bauteil i die Wahrscheinlichkeit ($P(k_i = io)$) bekannt sein. Die kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit, also die Wahrscheinlichkeit, dass mindestens eine Komponente defekt ist, und dadurch die Prüfung fehlschlägt lässt sich durch $1 - P(f_{ii} = pass|K)$ und $P(k_i = io)$ durch $1 - P(k_i = nio)$ ermitteln. Mit Hilfe der Formel (6.3) kann die kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit $P(f_{ii} = fail|K)$ der Prüfung t_i berechnet werden.

$$P(f_{ii} = fail|K) = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - P(k_j = nio)) \quad (6.3)$$

Für Komponenten, die von der Prüfung t_i überprüft werden, jedoch nicht in der Fehlerkandidatenliste enthalten sind, wird $P(k_j = nio) = 0$ angenommen. Die Wahrscheinlichkeit $P(f_{ii} = fail)$ wird umso größer, je mehr Fehlerkandidaten durch die Prüfung t_i überprüft werden und je höher die Einzelfehlerwahrscheinlichkeiten der Fehlerkandidaten sind.

²Diese Annahme kann getroffen werden, da Abhängigkeiten zwischen den Fehlerzuständen verschiedener Fehlerkandidaten zwar theoretisch möglich, jedoch praktisch vernachlässigbar sind.

6.3.3 Informationsgewinn einer Prüfung

Der Nachteil des gerade beschriebenen Verfahrens ist, dass unter Umständen Prüfungen vorgeschlagen werden, deren Ergebnis sich schon mit hoher Wahrscheinlichkeit vorhersagen lässt. Das bedeutet, dass der Informationsgewinn durch diese Prüfung minimal ist. Das folgende Beispiel soll dies verdeutlichen:

Beispiel: In einer elektrischen Verbindung, welche aus acht zusammengesteckten Abschnitten besteht, wird eine Unterbrechung vermutet. Alle Leitungsabschnitte haben die gleiche Fehlerwahrscheinlichkeit. An den Verbindungsstellen kann jeweils ein Messgerät zur Widerstandsmessung angeschlossen werden, um ein oder mehrere Leitungsabschnitte zu prüfen. Die kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit ist am größten, wenn über alle acht Leitungsabschnitte gemessen wird. Wenn die Messung fehlschlägt, wird jedoch lediglich bestätigt, dass einer der acht Leitungsabschnitte defekt ist. Wenn im zweiten Schritt die Prüfung mit der nächsthöheren kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit vorgeschlagen wird, werden entweder die ersten sieben oder die letzten sieben Leitungsabschnitte überprüft. Mit einer Wahrscheinlichkeit von $7/8$ (87,5%) wird auch diese Prüfung fehlschlagen. Sinnvoller erscheint es, nur bis zur Mitte zu messen und dadurch mit einer Messung je nach Ergebnis die erste oder zweite Hälfte der elektrischen Verbindung als Fehlerursache ausschließen zu können. Das Ergebnis dieser Messung ist schwer vorhersagbar (Wahrscheinlichkeit: 50%) und bringt deshalb einen hohen Informationsgewinn.

In der Informationstheorie wird der Informationsgehalt einer Nachricht oder eines Zeichens als Entropie bezeichnet. Dieser Begriff geht auf Claude E. Shannon in [SW63] zurück und steht in keinem direkten Zusammenhang mit dem gleichnamigen Begriff aus der Thermodynamik. Die Entropie kann in der Einheit *Bit* oder *Sh* (Shannon) angegeben werden. Der Informationsgehalt eines Symbols aus einem endlichen Alphabet (z.B. eines Zeichens innerhalb eines Textes) wird in *Bit/Zeichen* gemessen und gibt an, wie viele Bits für die Kodierung eines Zeichens minimal notwendig sind.

Definition Entropie nach [Ste07]: Ist X eine diskrete Zufallsvariable mit möglichen Realisationen $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ und zugehörigen Wahrscheinlichkeiten $p_i = P(X = x_i)$, dann heißt

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \cdot \log_2(p_i) \quad (6.4)$$

Entropie von X .

Bei einem zufälligen Ereignis wie einem Münzwurf, dessen Information einer von zwei Zuständen (Kopf oder Zahl) ist, beträgt der Informationsgehalt $1Sh$ oder $1Bit$. Wenn die beiden Zustände nicht mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten ist der Informationsgehalt³ $H(X) < 1Sh$. Die Formel (6.4) lässt sich für eine Informationsquelle mit zwei Zuständen zur Formel (6.5) vereinfachen.

$$H(X) = -(p_1 \cdot \log_2(p_1) + p_2 \cdot \log_2(p_2)) \quad (6.5)$$

Sowohl bei einem Münzwurf als auch bei den beiden Zuständen, die eine durchgeführte Prüfung haben kann (pass, fail), sind die Eintrittswahrscheinlichkeiten $p_1 + p_2 = 1$. Es muss demnach nur die Wahrscheinlichkeit eines der beiden Zustände bekannt sein. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine

³Da die Einheit *Bit* üblicherweise nur im Zusammenhang mit natürlichen Zahlen verwendet wird, wird im folgenden die Einheit *Sh* verwendet.

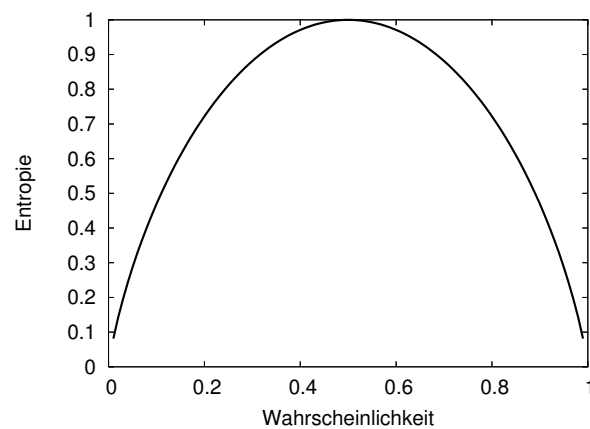


Abbildung 6.2.: Entropie $H(f_{ti})$ der Prüfung t_i abhängig von der Wahrscheinlichkeit $P(f_{ti} = fail)$

Prüfung fehlschlägt ($f_{ti} = fail$), entspricht der kombinierten Fehlerwahrscheinlichkeit der Prüfung (vgl. Abschnitt 6.3.2)

$$H(f_{ti}) = -(P(f_{ti} = fail) \cdot \log_2(P(f_{ti} = fail)) + (1 - P(f_{ti} = fail)) \cdot \log_2(1 - P(f_{ti} = fail))) \quad (6.6)$$

Mit Hilfe der Formel (6.6) kann die Entropie $H(f_{ti})$ für die Prüfung t_i berechnet werden. Die Abbildung 6.2 stellt die Funktion graphisch dar. Es ist zu erkennen, dass die Entropie bei einer Wahrscheinlichkeit von 0,5 maximal ist. Das bedeutet, dass der zu erwartende Informationsgewinn am höchsten ist, wenn absolute Ungewissheit über das zu erwartende Ergebnis besteht

Nutzung des Informationsgewinns

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass im fehlerhaften System genau ein Fehler vorhanden ist und sich das Ergebnis einer Prüfung auf die Fehlerwahrscheinlichkeiten aller Fehlerkandidaten auswirkt⁴. Bei der wahrheitswahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung aus Kapitel 4 sind die Komponenten (Fehlerkandidaten) bedingt abhängig, sobald die gemeinsame Wirkkette als fehlerhaft identifiziert wurde. Das bedeutet, wenn die Fehlerwahrscheinlichkeit eines Kandidaten herab gesetzt wird, steigt die Fehlerwahrscheinlichkeit der übrigen und umgekehrt. Eine Prüfung mit einer hohen Entropie wird dadurch – unabhängig vom Ergebnis – einen hohen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung innerhalb der Fehlerkandidatenliste haben. Wenn die Fehlerkandidatenliste sehr unsicher ist, also viele Fehlerkandidaten mit annähernd gleicher Fehlerwahrscheinlichkeit enthält, sollten die Prüfungen mit der höchsten Entropie durchgeführt werden. Dies hat zur Folge, dass ein großer Teil der Kandidaten ausgeschlossen werden kann und andere dadurch eine signifikante Fehlerwahrscheinlichkeit erreichen.

6.3.4 Gegenüberstellung der Kriterien

Mit dem Aufwand, der kombinierten Fehlerwahrscheinlichkeit und der Entropie wurden drei Größen zur Bewertung von Prüfungen vorgestellt. Im folgenden sollen jeweils Vor- und Nachteile der Verwendung der beschriebenen Größen zur Gewichtung der Prüfungen diskutiert werden.

Es besteht stets die Anforderung, ein Problem mit möglichst geringem Aufwand zu lösen. Aus diesem Grund muss der mit einer Prüfung verbundene Aufwand immer berücksichtigt werden. Es ist sinnvoll, dass Prüfungen mit geringem Aufwand zuerst durchgeführt werden. Es besteht dadurch die Chance, dass die Durchführung aufwändigerer Prüfungen nicht mehr notwendig

⁴Der komplexere Fall mit mehreren unabhängigen Fehlern wird im Abschnitt 6.4.3 behandelt.

ist, wenn der Fehler bereits durch einfache Prüfungen gefunden werden konnte. Prüfungen ausschließlich nach dem Aufwand zu gewichten ist jedoch nicht sinnvoll. Es besteht die Gefahr, dass Prüfungen durchgeführt werden, die nicht zielführend sind. Das bedeutet, dass die Prüfungen zwar mit geringem Aufwand verbunden sind, allerdings nicht die Komponenten prüfen, die eine hohe Fehlerwahrscheinlichkeit haben.

Indem stets die Kandidaten mit der höchsten Fehlerwahrscheinlichkeit geprüft werden, kann die Ermittlung der Fehlerursachen mit wenigen sinnvollen Schritten erfolgen. Eine geringe Anzahl an notwendigen Schritten wirkt sich positiv auf den Gesamtaufwand aus. Eine explizite Berücksichtigung der einzelnen Aufwände fehlt jedoch. Bei einer Gewichtung der Prüfungen nach den kombinierten Fehlerwahrscheinlichkeiten werden die Prüfungen, welche die meisten Fehlerkandidaten mit den höchsten Fehlerwahrscheinlichkeiten prüfen, am stärksten gewichtet. Eine hohe kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass die Prüfung sinnvoll ist. Eine Prüfung z. B. die alle verdächtigten Komponenten prüft und fehlschlägt, bringt keine neue Information. Sie bestätigt nur, was auch vorher schon bekannt war, dass mindestens eine der Komponenten defekt ist.

Wird der Informationsgewinn zur Gewichtung der Prüfungen verwendet, werden Prüfungen bevorzugt, die ein Maximum an neuer Information liefern. Das Ziel der eindeutigen Identifikation der Fehlerursache durch eine Prüfung wird jedoch nicht unterstützt. Komponenten, die eine hohe Fehlerwahrscheinlichkeit haben, werden nicht weiter geprüft. Dadurch wird die Fehlerursache nie eindeutig als solche identifiziert. Auch der notwendige Aufwand für die Prüfung wird nicht berücksichtigt.

Keine der drei Methoden erfüllt alle Anforderungen zur sinnvollen Auswahl der nächsten Prüfung vollständig. Deshalb wird im folgenden Abschnitt ein Verfahren vorgestellt, das die Vorteile der drei Methoden kombiniert.

6.4 Zweistufige Prüfstrategie

Es wird immer noch davon ausgegangen, dass es in dem fehlerhaften System genau eine Fehlerursache gibt. Diese Annahme stimmt nicht immer, vereinfacht die Entwicklung einer Prüfstrategie jedoch erheblich. Für einen Ablauf, wie er in Abbildung 6.1 dargestellt ist, ist die Annahme jedoch sinnvoll. Demnach werden solange Prüfungen vorgeschlagen und durchgeführt, bis ein Bauteil eindeutig als fehlerhaft identifiziert ist. Nachdem dieses Instand gesetzt wurde, wird überprüft, ob das System fehlerfrei ist. Sollte weiterhin eine Störung vorliegen, wird erneut nach einem fehlerverursachenden Bauteil gesucht. Der Ablauf endet, wenn das System fehlerfrei ist.

Die wahrheitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung erzeugt eine gewichtete Liste mit Fehlerkandidaten. Das eine bestimmte Komponente dort enthalten ist, stellt eine Hypothese dar. Das System behauptet oder vermutet mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, dass die Komponente defekt ist. Ziel der Prüfungen ist es, diese Hypothese mit möglichst geringem Aufwand entweder zu beweisen oder zu widerlegen.

Da davon ausgegangen wird, dass die Störung genau eine Ursache hat, muss das Diagnosesystem zunächst den Top-Fehlerkandidaten⁵ identifizieren. Im Anschluss daran muss es beweisen, dass der Kandidat tatsächlich defekt ist. Der Beweis kann auf zwei Arten erfolgen:

1. Das Bauteil wird durch eine Prüfung, die nur dieses eine Bauteil prüft, eindeutig als defekt identifiziert.
2. Durch Ausschlussverfahren (wahrscheinlichkeitsbasiertes Schließen) können alle anderen in Frage kommenden Kandidaten ausgeschlossen werden.

Die zweite Variante birgt ein gewisses Risiko. Falls mögliche Fehlerursachen übersehen und somit nicht geprüft wurden, liefert das Ausschlussverfahren ein falsches Ergebnis. Vermeintlich

⁵vgl. Definition im Abschnitt 6.4.1

defekte Bauteile sollten deshalb, wenn möglich bevor sie kostenpflichtig ersetzt werden, überprüft werden.

6.4.1 Ermittlung des Top-Fehlerkandidaten

Definition Top-Fehlerkandidat: Ein Top-Fehlerkandidat liegt vor, wenn die Fehlerwahrscheinlichkeit des Kandidaten mit der höchsten Fehlerwahrscheinlichkeit höher ist als die Summe der Fehlerwahrscheinlichkeiten aller anderen Komponenten.

Zu Beginn einer Diagnosesitzung ist normalerweise kein Top-Fehlerkandidat bekannt. In den meisten Fällen enthält die Fehlerkandidatenliste eine Reihe von Bauteilen, die eine annähernd gleiche Fehlerwahrscheinlichkeit aufweisen. Dies drückt die Unsicherheit bei der Fehlerkandidatenermittlung aus und liegt an den unzureichenden Informationen, die dem Diagnosesystem zu diesem Zeitpunkt zur Verfügung stehen.

Die bedingte Abhängigkeit der Fehlerwahrscheinlichkeiten innerhalb der Fehlerkandidatenliste bewirkt, dass eine Veränderung der Fehlerwahrscheinlichkeit (z. B. in Folge einer Prüfung) eines oder mehrerer Bauteile Auswirkungen auf die Fehlerwahrscheinlichkeiten der übrigen Bauteile hat. Wird ein Bauteil geprüft, das eine sehr hohe oder sehr niedrige Fehlerwahrscheinlichkeit hat, und bestätigt das Ergebnis lediglich die Vermutung, ändern sich die Wahrscheinlichkeiten in der Fehlerkandidatenliste nur minimal.

Ein effizienter Prüfablauf muss mit möglichst wenigen Schritten die Unsicherheit in der Fehlerkandidatenliste minimieren können. Deshalb müssen Prüfungen ausgewählt werden, die einen möglichst hohen Informationsgewinn liefern.

Damit auch der Aufwand in die Gewichtung mit einfließt, wird aus der Entropie und dem Aufwand eine Effektivität berechnet. Die Formel (6.7) zeigt die entsprechende Berechnungsvorschrift für die Effektivität einer Prüfung ($ef(t_i)$). $H(f_{ii})$ ist die Entropie des zu erwartenden Ergebnisses der Prüfung t_i . $C_{ii}(PZ)$ ist eine Kostenfunktion. Sie gibt den Aufwand zur Durchführung der Prüfung an und berücksichtigt dabei bereits freigelegte Messpunkte. Die Werte der Funktion $C_{ii}(PZ)$ liegen genau wie $H(f_{ii})$ im Bereich von > 0 bis ≤ 1 .

$$ef(t_i) = \frac{H(f_{ii})}{C_{ii}(PZ)} \quad (6.7)$$

Solange kein Top-Fehlerkandidat bekannt ist, werden die Prüfungen im Prüfplan mit Hilfe der Effektivität nach Formel (6.7) gewichtet. Dem Mechaniker wird die Prüfung mit der höchsten Effektivität vorgeschlagen.

6.4.2 Prüfen des Top-Fehlerkandidaten

Die Wahrscheinlichkeit, dass bereits durch die auf Grund der Entropie und Effektivität vorgeschlagenen Prüfungen die Ursache des Fehlers gefunden wird, ist recht hoch. Immerhin werden dabei vorzugsweise Prüfungen ausgewählt, deren kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit nahe 0,5 liegt, was einer vergleichsweise hohen Wahrscheinlichkeit entspricht. Wenn die wahrscheinlickeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung jedoch eine sehr hohe Fehlerwahrscheinlichkeit für ein bestimmtes Bauteil errechnet hat, kann es passieren, dass ausgerechnet die zu diesem Bauteil gehörenden Prüfungen nicht durchgeführt werden. Das liegt daran, dass die entsprechenden Prüfungen ebenfalls eine hohe kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit ($P(f_{ii} = fail) > 0,5$) haben. Dies führt nach Formel (6.6) zu einer geringen Entropie und dadurch zu einer geringen Effektivität.

Sobald ein Top-Fehlerkandidat vorhanden ist, wird deshalb eine andere Strategie verwendet. Ziel ist es dann nicht mehr, möglichst viele Informationen über den Zustand des Systems zu sammeln, sondern eine hohe Sicherheit bei der Aussage über den Zustand des Top-Fehlerkandidaten zu erreichen. Wenn eine Prüfung vorhanden ist, die nur den Top-Fehlerkandidaten prüft, bekommt

diese unabhängig vom damit verbundenen Aufwand eine Effektivität von 1,0 zugewiesen. Wenn die Prüfung durchgeführt wird und fehlschlägt (fail), ist die Fehlerursache identifiziert und der Mechaniker wird aufgefordert, das Bauteil instand zu setzen (vgl. Abbildung 6.1). Bei einem Bestehen der Prüfung (pass) wird die Fehlerwahrscheinlichkeit des Top-Fehlerkandidaten auf 0,0 gesetzt. Dadurch wird das betreffende Bauteil aus der Fehlerkandidatenliste entfernt und es wird nach einem neuen Top-Fehlerkandidaten gesucht.

Sind mehrere Prüfungen, die den Top-Fehlerkandidaten überprüfen, vorhanden, müssen diese sinnvoll gewichtet werden, um die effektivste Prüfung auswählen zu können. Die Effektivität ist am größten, wenn die Prüfung eine eindeutige Aussage über den Fehlerzustand des Top-Fehlerkandidaten machen kann. Wenn eine Prüfung n Komponenten $\{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ mit $n > 1$ prüft, wobei k_1 der Top-Fehlerkandidat ist, lässt sich die Effektivität der Prüfung mit Formel (6.8) ermitteln. Bei einer Fehlerwahrscheinlichkeit von $P(k = nio) = 0,0$ für $\{k_2, \dots, k_n\}$ beträgt die Effektivität $ef(t_i) = 1,0$. Sobald ein oder mehrere Kandidaten eine höhere Fehlerwahrscheinlichkeit aufweisen, reduziert sich die Effektivität.

$$ef_{top}(t_i) = \prod_{j=2}^n 1 - P(k_j = nio) \quad (6.8)$$

6.4.3 Clusterung der Prüfungen bei unabhängigen Fehlern

Bei der Entwicklung der zweistufigen Prüfstrategie wurde zunächst davon ausgegangen, dass im Fahrzeug genau ein Bauteil fehlerhaft ist und alle Fehlersymptome auf Grund dieses Einzelfehlers vorhanden sind. Diese Annahme trifft in der Praxis jedoch nicht immer zu. Sobald in einem Fahrzeug mehrere unabhängige Fehler vorliegen, wird es wahrscheinlich nicht gelingen, einen Top-Fehlerkandidaten gemäß Definition auf Seite 92 zu identifizieren.

Bei einem Einzelfehler sind alle Fehlerkandidaten voneinander abhängig. Das bedeutet, wenn ein Bauteil geprüft wird und dadurch eine neue Erkenntnis entsteht, hat dies Auswirkungen auf die Fehlerwahrscheinlichkeiten aller anderen Fehlerkandidaten. Bei der Maximierung der Entropie wird genau dieses Verhalten ausgenutzt, indem sichere Informationen über die Fehlerzustände der Kandidaten ermittelt werden, über die bisher höchste Ungewissheit besteht.

Liegen unabhängige Einzelfehler vor, sind ein Teil der Fehlerkandidaten voneinander unabhängig. In dem Bayes-Netz der wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung ist dies daran zu erkennen, dass es keine Abhängigkeiten zwischen den Komponentenknoten über gemeinsame Wirkkettenknoten gibt. Wenn zwei unabhängige Fehler A und B vorliegen, hat die Überprüfung eines Fehlerkandidaten, der Fehler A hervorgerufen haben könnte, keinen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeiten der Kandidaten, die Ursache für Fehler B sein können.

Eine effektive Lösung zur Diagnose von mehreren unabhängigen Fehlern liegt in einer Clusterung der Fehlerkandidaten und Prüfungen. Im Abschnitt 4.6 wurde gezeigt, wie die Kandidaten innerhalb der Fehlerkandidatenliste in mehrere Cluster eingeteilt werden können. Die Clusterung geschieht auf Basis der Abhängigkeiten, die aus der fahrzeugindividuellen Strukturbeschreibung extrahiert werden.

Die Clusterung innerhalb des Prüfplans funktioniert nach dem gleichen Prinzip wie die Clusterung in der Fehlerkandidatenliste. Jeder Fehlerkandidat enthält eine Information darüber, auf Grund welches oder welcher Fehlersymptome er in die Fehlerkandidatenliste aufgenommen wurde. Bei der Generierung von Prüfungen für ein oder mehrere Fehlerkandidaten wird die Zugehörigkeit zu den Symptomen übernommen. Diese Informationen, die zu jeder Prüfung vorhanden sind, werden wiederum zur Bildung von Clustern innerhalb des Prüfplans verwendet.

Die Abbildung 6.3 stellt den beschriebenen Ablauf schematisch dar. Der Fehlerkandidatenermittlung werden Fehlersymptome übergeben, die drei unabhängige Fehler beschreiben. Die ermittelte Fehlerkandidatenliste wird entsprechend der Anzahl der unabhängigen Fehler in

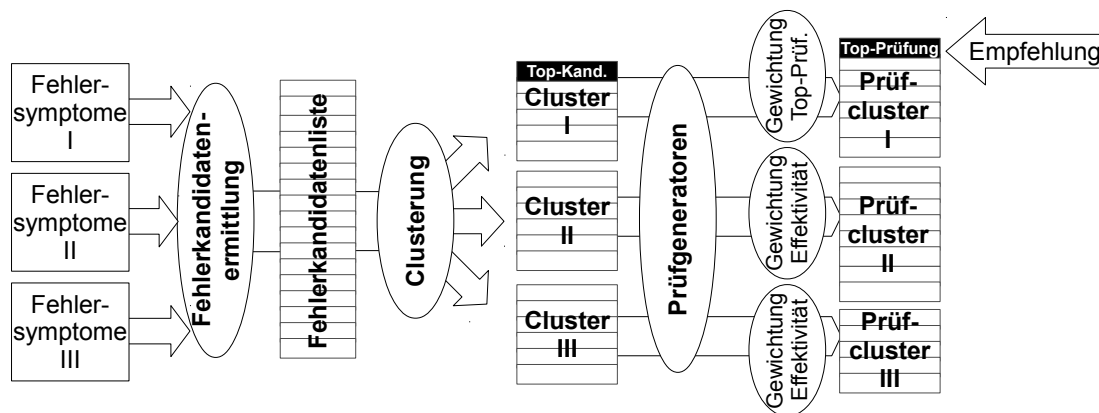


Abbildung 6.3.: Clusterung der Fehlerkandidaten und Prüfungen

einzelne Cluster aufgeteilt. Die Prüfgeneratoren erzeugen zur Überprüfung der Fehlerkandidaten unterschiedliche Prüfungen und behalten die Einteilung der Cluster bei. Innerhalb der Prüfcluster findet anschließend eine Gewichtung mit Hilfe der zweistufigen Prüfstrategie statt.

Der Cluster 1 in Abbildung 6.3 besitzt im Gegensatz zu den Clustern 2 und 3 einen Top-Fehlerkandidat. Die Prüfungen zur Überprüfung der Fehlerkandidaten aus den Clustern 2 und 3 werden innerhalb des jeweiligen Prüf-Clusters unter Verwendung der Entropie und der Kosten gemäß Formel (6.7) gewichtet. Dies entspricht der ersten Stufe der zweistufigen Prüfstrategie. Im Cluster 1 ist bereits ein Top-Fehlerkandidat ermittelt. Alle Prüfungen, die diesen Kandidaten prüfen, werden innerhalb des Prüf-Clusters 1 als Top-Prüfungen markiert und oberhalb der übrigen Prüfungen angezeigt. In einem Cluster kann es gemäß der Definition maximal einen Top-Fehlerkandidaten geben. Top-Prüfungen können hingegen mehrere vorhanden sein. Die Gewichtung der Top-Prüfungen erfolgt nach Formel (6.8).

6.5 Dynamischer Prüfplan

Der dynamische Prüfplan ist ein Softwaremodul innerhalb des wahrscheinlichkeitsbasierten Diagnosesystems FiDis. Seine Aufgabe besteht in der Verwaltung, Gewichtung und Auswahl der Prüfungen sowie in der Interaktion mit dem Anwender. Die Abbildung 6.4 zeigt die Benutzerschnittstelle des Prüfplans, so wie sie unmittelbar nach der Generierung der Prüfungen dargestellt wird. Der Mechaniker kann während einer Diagnosesitzung jederzeit in diese Ansicht wechseln, um sich einen Überblick über die zur Verfügung stehenden Prüfungen zu verschaffen oder um gezielt in den Prüfablauf einzugreifen.

Der Prüfplan ist eine zentrale Instanz innerhalb des Diagnosesystems. Er hat Zugriff auf alle Fehlersymptome, auf die gewichtete Fehlerkandidatenliste mit ihren Fehler-Clustern sowie auf alle generierten Prüfungen. Die Aufgabe des dynamischen Prüfplans besteht darin, diese Prüfungen zu Prüf-Clustern zusammenzufassen, sie gemäß der zweistufigen Prüfstrategie zu gewichten und der Reihe nach auszugeben. Wie in Abbildung 6.1 dargestellt ist, erfolgt nach jeder durchgeführten Prüfung eine Aktualisierung der Fehlerkandidaten und des Prüfplans. In Abbildung 6.5 ist der Ablauf der Aktualisierung dargestellt.

6.5.1 Hinzufügen und Entfernen von Prüfungen

Sobald neue Fehlerkandidaten ermittelt worden sind, erzeugen die Prüfgeneratoren dafür neue Prüfungen. Dies geschieht sowohl initial, nachdem die Fehlerkandidatenliste erstmals befüllt wurde, als auch nach jeder Aktualisierung, sobald neue Kandidaten hinzugekommen sind. Prüfungen, die bereits durchgeführt wurden, verbleiben im Prüfplan und enthalten das Ergebnis der Prüfung.

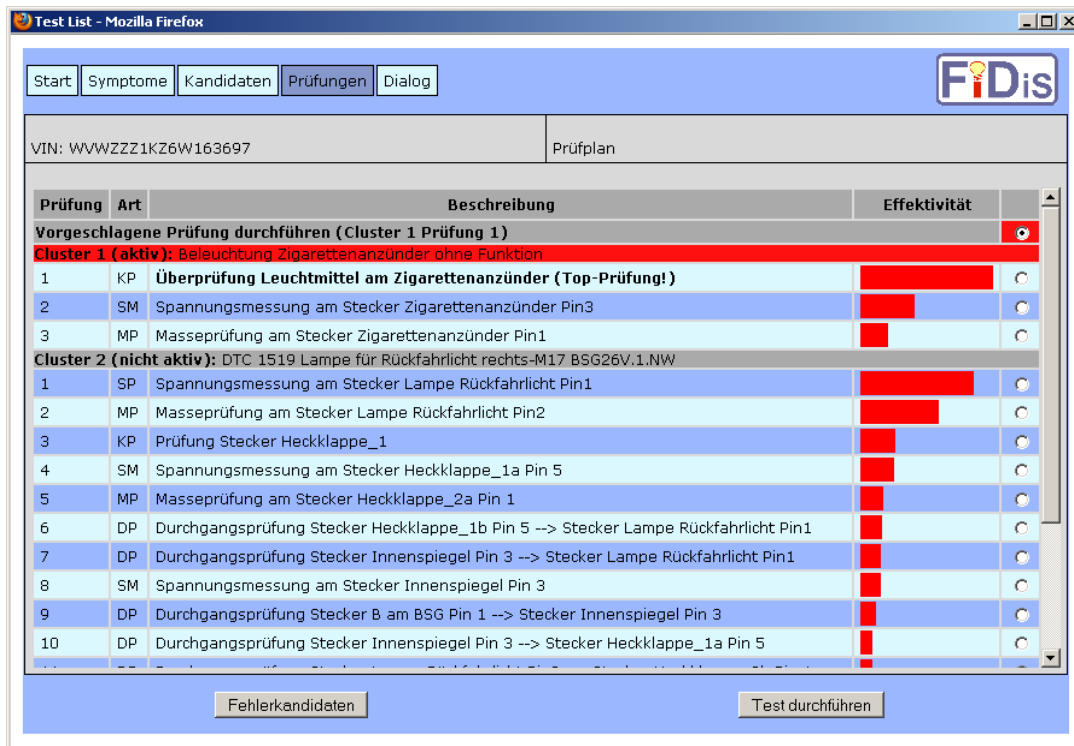


Abbildung 6.4.: Gewichteter Prüfplan mit der Möglichkeit zum automatischen oder manuellen Auswählen der Prüfungen

Prüfungen, die noch nicht durchgeführt wurden, werden automatisch entfernt, sobald der oder die zugehörigen Fehlerkandidaten nicht mehr in der Fehlerkandidatenliste enthalten sind.

Bevor eine neue Prüfung in den Prüfplan aufgenommen wird, wird überprüft, ob nicht bereits eine identische Prüfung vorhanden ist. Dies ist z. B. dann der Fall, wenn zuvor für ein benachbartes Bauteil Prüfungen erzeugt wurden und ein Teil davon beide Bauteile prüfen. Wenn dies der Fall ist, wird die Prüfung nicht erneut hinzugefügt, sondern es werden die Informationen in der vorhandenen Prüfung erweitert. Jede Prüfung enthält Informationen darüber, auf Grund welches oder welcher Fehlerkandidaten sie erzeugt wurde. Auch ist es für die Einteilung der

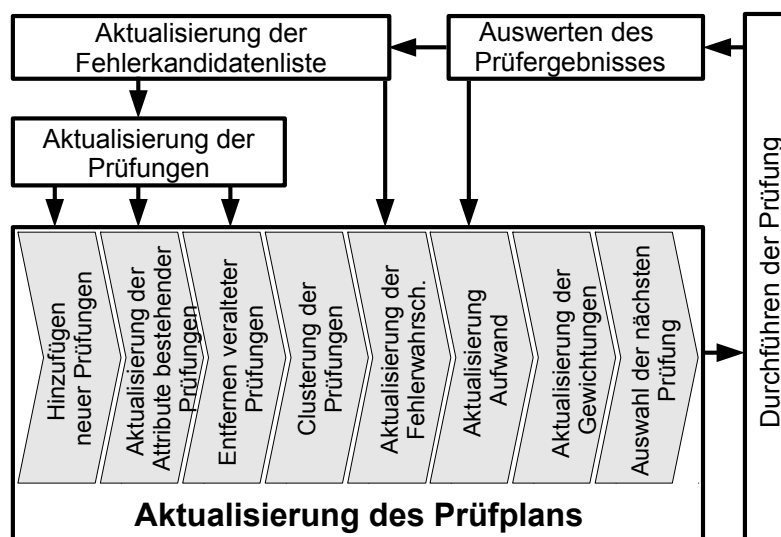


Abbildung 6.5.: Aktualisierung des Prüfplans

Prüfungen in Prüf-Cluster notwendig, die korrespondierenden Fehlersymptome zu kennen. All diese Informationen müssen aktualisiert werden. Das Entfernen einer Prüfung funktioniert analog dazu. Erst wenn eine Prüfung zu keinem der Fehlerkandidaten mehr zugeordnet werden kann, wird sie entfernt. Andernfalls werden lediglich die zusätzlichen Informationen entfernt.

Bei jeder Aktualisierung des Prüfplans (d.h. auch nach dem Hinzufügen oder Entfernen von Prüfungen) müssen die Gewichtungen der Prüfungen aktualisiert werden. Dabei wird zunächst für jeden Prüf-Cluster anhand der Fehler-Cluster überprüft, ob es bereits einen Top-Fehlerkandidaten gibt. Wie im Abschnitt 6.4 beschrieben, hängt davon die Methode der Gewichtung innerhalb des jeweiligen Clusters ab. Die kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit wird für jede Prüfung nach Formel (6.3) aus den Informationen der Fehlerkandidatenliste berechnet. Für die Ermittlung des Aufwands für eine Prüfung werden die Aufwände der einzelnen Messpunkte sowie die Informationen über bereits freigelegte Messpunkte ausgewertet. Im Anschluss daran wird die Effektivität der Prüfungen nach Formel (6.7) bzw. (6.8) berechnet und in der jeweiligen Prüfung abgelegt.

Nachdem alle Prüfungen aktualisiert wurden, werden sie innerhalb des zugehörigen Prüf-Clusters anhand der Effektivität in absteigender Reihenfolge sortiert, so dass die Prüfung mit der höchsten Effektivität an erster Stelle steht. Wenn es mehrere Prüfungen mit gleicher Effektivität gibt, wird jeweils die Prüfung mit dem geringsten Aufwand an oberster Position angeordnet. Dies ist vor allem bei Top-Prüfungen wichtig, da der Aufwand dort nicht in die Effektivität eingeht. Wenn mehrere Top-Prüfungen existieren, die jeweils die gleichen Komponenten mit unterschiedlichem Aufwand prüfen (z. B. durch unterschiedliche Messverfahren) wird für alle die gleiche Effektivität berechnet.

6.5.2 Auswahl der nächsten Prüfung

Im einfachsten Fall wird immer automatisch die Prüfung mit der höchsten Effektivität ausgewählt. Wenn mehrere unabhängige Fehler und damit mehrere Prüf-Cluster vorliegen, ist dies jedoch nicht sinnvoll. Bei der Fehlersuche sollte systematisch ein Fehler nach dem anderen gesucht werden. Das bedeutet für den Prüfablauf, dass, nachdem eine Prüfung durchgeführt wurde, als nächstes eine Prüfung aus dem gleichen Cluster geladen wird. Aus diesem Grund wird im Prüfplan jeweils der Cluster markiert, aus dem die letzte Prüfung ausgewählt wurde. Nach einer Aktualisierung des Prüfplans wird dann aus diesem Cluster die effektivste Prüfung ausgewählt. Innerhalb eines Clusters wird solange geprüft, bis die Fehlerursache identifiziert ist oder bis der Anwender manuell in die Prüfplanansicht wechselt und dort eine Prüfung aus einem anderen Cluster auswählt.

6.5.3 Ausgabe der Prüfung

Nachdem die Prüfung ausgewählt wurde, wird mit Hilfe der parametrierbaren Prüfanweisungen (vgl. Abschnitt 5.2) eine Anweisung für den Mechaniker erzeugt und angezeigt. Der Mechaniker kann diese Prüfung durchführen und im Anschluss das Ergebnis eingeben oder er kann diese Prüfung explizit ignorieren (Abbildung 5.1). Durch diese Funktionalität unterscheidet sich der dynamische Prüfablauf vom starren Ablauf eines Fehlersuchprogramms. Dort müssen immer alle Prüfschritte der Sequenz durchgeführt werden, um zu einem Ergebnis zu kommen. Der Abbruch einer einzelnen Prüfung sorgt dort für den Abbruch des gesamten Fehlersuchprogramms.

Mechaniker haben oftmals viele Erfahrungen und sollten diese Erfahrungen auch in die Fehlersuche einbringen können. Über die manuelle Auswahl von Prüfungen aus dem Prüfplan sowie das explizite Ignorieren von Prüfungen kann der Mechaniker Einfluss auf den Prüfablauf nehmen. Auf die Fehlerkandidatenermittlung kann der Mechaniker Einfluss nehmen, indem er zusätzliche Symptome manuell eingibt und ermittelte Fehlerkandidaten explizit ausschließen kann.

Die Tatsache, dass der Mechaniker einen Schritt nicht durchführen möchte, wird abgespeichert, so dass diese Prüfung innerhalb der Diagnosesitzung vom System nicht mehr vorgeschlagen wird.

Wenn im dynamischen Prüfablauf eine einzelne Prüfung ignoriert wird, liegt dem Diagnosesystem kein verwertbares Ergebnis der Prüfung vor. Dies muss jedoch nicht nachteilig sein, wenn die Fehlerursache mit den anderen Prüfungen auch gefunden werden kann.

Der Mechaniker kann jederzeit in die Prüfplanansicht wechseln und dort eine andere Prüfung auswählen. Es ist auch möglich, Prüfungen auszuwählen, die er vorher explizit ignoriert hat und Prüfungen, die bereits durchgeführt wurden. Dadurch kann der Mechaniker Eingaben, die er zuvor getroffen hat, revidieren, ohne dabei die Ergebnisse anderer Prüfungen zu löschen. Bei einem klassischen Fehlersuchprogramm wäre das nicht möglich. Dort müssten alle folgenden Prüfungen ebenfalls wiederholt werden.

6.5.4 Auswerten des Prüfergebnisses

Nachdem eine Prüfung durchgeführt wurde, muss das eingegebene Ergebnis ausgewertet werden. Zuerst werden die freigelegten Messpunkte aktualisiert. Abhängig von der Art der Prüfung wurde der Mechaniker aufgefordert, bestimmte Messpunkte, z.B. Anschlüsse an elektrischen Bauteilen oder Koppelstecker im Leitungsstrang, freizulegen. Dafür ist es i.d.R. nötig, Verkleidungen, Halterungen und ähnliches auszubauen, was jeweils mit einem gewissen Aufwand verbunden ist. Nachdem dieser Aufwand einmal investiert wurde, können an diesem Messpunkt weitere Messungen ohne erneuten Aufwand durchgeführt werden. Damit der Aufwand nicht mehrfach berücksichtigt wird, wird in der Liste der Messpunkte vermerkt, welche Messpunkte bereits freigelegt wurden.

Als nächstes muss die Fehlerkandidatenliste aktualisiert werden. Dafür wird das Ergebnis der Prüfung ausgewertet. Wie im Abschnitt 5.7.1 beschrieben, sorgt das Ergebnis *pass* dafür, dass die Fehlerwahrscheinlichkeiten der geprüften Komponenten auf 0,0 gesetzt werden, während bei einem *fail* die enthaltenen Fehlerkandidaten anteilig belastet werden.

Nach einer Berechnung des Bayes-Netzes zur wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung ändern sich die Fehlerkandidaten und ihre Wahrscheinlichkeiten. Wenn die Fehlerwahrscheinlichkeit eines Fehlerkandidaten nach der Aktualisierung 1,0 beträgt, ist er dadurch als fehlerhaftes Bauteil identifiziert. Es kann passieren, dass die ermittelte Fehlerwahrscheinlichkeit nicht genau 1,0 beträgt, aber dennoch von einem eindeutigen Befund gesprochen werden kann. Dies kann z.B. der Fall sein, wenn ein Bauteil nicht durch eine Einzelprüfung, sondern durch Ausschluss von anderen Fehlerkandidaten als einzige möglichen Ursache identifiziert wird. Es hat sich deshalb als sinnvoll herausgestellt, einen Toleranzbereich von $0,98 \leq P(k = nio) \leq 1,0$ zu definieren, innerhalb dessen ein Bauteil als fehlerhaft bezeichnet wird.

Wenn die Fehlerursache gefunden wurde, wird – wie in Abbildung 6.1 dargestellt – keine neue Prüfung geladen, sondern es wird das fehlerhafte Bauteil ausgegeben, damit es instand gesetzt werden kann. Wenn kein fehlerhaftes Bauteil identifiziert wurde, wird die nächste Prüfung ermittelt. Dafür muss der Prüfplan, wie oben beschrieben, aktualisiert werden. Eventuell kommen dabei neue Prüfungen hinzu oder aber es werden Prüfungen entfernt. In jedem Fall muss daraufhin die kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit, der Aufwand und die Effektivität der Prüfungen neu berechnet werden. Im Anschluss daran wird die nächste Prüfung ausgewählt und ausgegeben.

6.6 Test des Prüfablaufs

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, ob die im Zusammenhang mit dem dynamischen Prüfablauf entwickelten Verfahren geeignet sind, um das im Abschnitt 3.3 beschriebene Problem (Flexibilität und Reihenfolge der Prüfungen) zu lösen, indem die daraus abgeleiteten Anforderungen (Abschnitt 6.2) erfüllt werden. Ausgehend von den Anforderungen wurden vier Testfälle (A.3.1 bis A.3.4) entwickelt. Die Testfälle sind gleichermaßen strukturiert, wie die Testfälle aus Abschnitt 4.8 und 5.8.

Die detaillierte Beschreibung der Testfälle ist im Anhang (ab Seite 157) abgedruckt. Im Folgenden erfolgt lediglich eine Zusammenfassung der Testfälle und Ergebnisse. Die Tabelle 6.1 stellt dar, welche Anforderungen aus Abschnitt 6.2 durch die jeweiligen Prüfungen abgedeckt werden. Bei den einzelnen Prüfungen kann dadurch auf die Beschreibung der Anforderungsabdeckung verzichtet werden.

Gewichtung der Prüfungen

Das Ziel des dynamische Prüfablaufs ist es, den Ablauf der Fehlersuche so effizient wie möglich zu gestalten. Um in der jeweiligen Situation die beste der zur Verfügung stehenden Prüfungen auszuwählen zu können, ist es notwendig, diese zu gewichten. In diesem Kapitel wurden vier Kenngrößen zur Bewertung und Gewichtung der Prüfungen beschrieben:

- zu erwartender Aufwand bei der Durchführung einer Prüfung ($C(PZ)$)
- kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit aller durch eine Prüfung geprüften Komponenten ($P(f_{ii})$)
- zu erwartender Informationsgewinn bezüglich der möglichen Fehlerkandidaten ($H(f_{ii})$)
- Effektivität als Quotient aus Informationsgewinn und Aufwand (ef) nach Formel (6.7)

Im Abschnitt 6.4 wurde angenommen, dass die ermittelte Effektivität nach Formel (6.7) am besten geeignet ist, um den TOP-Fehlerkandidaten zu ermitteln. Die Prüfung A.3.1 ab Seite 157 soll diese Vermutung anhand von praktischen Beispielen eines realen Fehlerfalls in einem Fahrzeug untermauern. Die möglichen Fehlerkandidaten sowie eine Menge sinnvoller Prüfungen für diesen Fehlerfall wurde bereits in früheren Untersuchungen ermittelt. Für alle Prüfungen werden die zuvor genannten Kenngrößen berechnet und gegenüber gestellt.

Mit der Untersuchung kann gezeigt werden, dass die mit Hilfe der Formel (6.7) bestimmte Effektivität besser zur Gewichtung der Prüfungen geeignet ist, als die drei Ausgangsverfahren. Die Prüfung wird als bestanden bewertet.

Veränderung der Gewichtung in Folge von Prüfergebnissen

Sobald eine Prüfung durchgeführt wurde und ein Ergebnis vorliegt, wird dieses vom System ausgewertet. Das Ergebnis einer Prüfung kann *bestanden* (*pass*) oder *nicht bestanden* (*fail*) lauten. Das Ergebnis *pass* bedeutet, dass die überprüfte Eigenschaft aller überprüften Elemente dem Nominalverhalten entspricht. Das Ergebnis *fail* bedeutet, dass die überprüfte Eigenschaft von mindestens einem überprüften Element nicht dem Nominalverhalten entspricht. Wenn z.B. eine Durchgangsprüfung zwei in Reihe geschaltete Leitungen überprüft, bedeutet das Prüfergebnis *pass*, dass keine der Leitungen unterbrochen ist. Bei der Auswertung des Prüfergebnisses werden folgende Informationen ermittelt bzw. aktualisiert:

- Aktualisierung der Fehlerkandidatenliste (Menge der Elemente sowie Fehlerwahrscheinlichkeiten)
- Aktualisierung der bisher nicht durchgeführten Prüfungen (u. a. Aktualisierung der kombinierten Fehlerwahrscheinlichkeiten)

Prüfungen	Abdeckung der Anforderungen										
	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
A.3.1 Gewichtung der Prüfungen		×		×	×						
A.3.2 Veränderung der Gewichtungen in Folge von Prüfergebnissen						×					
A.3.3 Benutzerinteraktion			×				×	×	×	×	×
A.3.4 Vergleich der Gewichtungsverfahren	×		×								

Tabelle 6.1.: Abdeckung der Anforderungen aus Abschnitt 6.2 durch die Prüfungen im Abschnitt A.3

- Prüfungen, die nicht mehr relevant sind, werden aus dem Prüfplan entfernt
- Aufnahme möglicher neuer Prüfungen
- Aktualisierung der Kosten der Prüfschritte, da u. U. Messpunkte freigelegt wurden

Auf Grund der geänderten Eingangsgrößen müssen die Berechnungen zur Gewichtung der Prüfungen nach jedem Prüfschritt erneut durchgeführt werden. Durch dieses Vorgehen, werden bei der Auswahl eines Prüfschritts alle Erkenntnisse bisher durchgeführter Prüfungen berücksichtigt. Dies ist eines der wichtigsten Leistungsmerkmale des dynamischen Prüfablaufs.

Im Testfall A.3.2 ab Seite 161 wird an einem konkreten Beispiel untersucht, wie sich die Gewichtungsfaktoren (Aufwand, kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit, Informationsgewinn, Effektivität) nach dem Durchführen eines Prüfschritts ändern. Zu diesem Zweck werden ausgehend von dem im Prüffall A.3.1 verwendeten initialen Zustand des Systems vier vorher festgelegte Prüfschritte durchgeführt. Die daraufhin berechneten Kenngrößen zur Gewichtung der Prüfungen werden dargestellt und analysiert.

Das Verhalten des Systems ist plausibel und entspricht den Erwartungen. Sowohl die Elemente und Wahrscheinlichkeiten der Fehlerkandidatenliste als auch die Bewertungsgrößen P , C und ef verändern sich nach jedem Prüfschritt erwartungsgemäß. Die Eingrenzung der Fehlerursache ist dadurch zu erkennen, dass sowohl die Anzahl der Fehlerkandidaten als auch die Anzahl der relevanten Prüfungen mit jedem Schritt geringer wird. Die Prüfung wird als bestanden bewertet.

Benutzerinteraktion

Beim Testfall A.3.3 ab Seite 164 sollen die verschiedenen Möglichkeiten zur Interaktion des Benutzers mit dem System untersucht und dargestellt werden. Für diese Untersuchung kommt das im Kapitel 7 beschriebene System FiDis zum Einsatz. Neben der automatischen Auswahl der jeweils „besten“ Prüfung durch das System, soll der Anwender jederzeit selbständig Einfluss auf die Prüfsequenz nehmen können und dadurch z. B. Prüfungen vorziehen, überspringen, zu einem späteren Zeitpunkt ausführen bzw. wiederholen oder gänzlich ignorieren können. Die Auswirkungen der durchgeführten Prüfungen und deren Ergebnissen auf die Fehlerkandidatenliste und die kommenden Prüfschritte sollen dabei jederzeit nachvollziehbar sein. Der Testfall zeigt auch, wie das System mit mehreren unabhängigen Fehlern (Clusterung von Fehlerkandidaten und Prüfungen) umgeht.

Das Verhalten des Systems ist nachvollziehbar und genügt den Anforderungen aus Abschnitt 6.2. Die Prüfung wird als bestanden gewertet.

Vergleich der Gewichtungsverfahren

Der Testfall A.3.4 ab Seite 166 untersucht das Verhalten des dynamischen Prüfablaufs, wenn die Bewertungskriterien tatsächlich zur Auswahl des nächsten Prüfschritts herangezogen werden. Es werden Prüfsequenzen für zwei verschiedene Fehlerfälle generiert. Als Auswahlkriterium werden jeweils der Aufwand, die kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit sowie die zweistufige Prüfstrategie verwendet. Die sechs Prüfsequenzen werden dargestellt und bewertet. Das Szenario entspricht dem Testfall A.3.2 mit dem Unterschied, dass die Prüfsequenz nicht für alle drei Verfahren gleichermaßen vorgegeben ist, sondern durch das jeweilige Verhalten des Systems bestimmt wird.

Die untersuchten Fälle zeigen, dass mit der zweistufigen Prüfstrategie im Vergleich zu den anderen Verfahren deutlich effizientere Prüfsequenzen möglich sind. Im Vergleich mit der Prüfungsauswahl anhand des zu erwartenden Aufwands führt die zweistufige Prüfstrategie zu einer um 18% effizienteren⁶ Prüfsequenz. Im Vergleich mit der Auswahl anhand der kombinierten Fehlerwahrscheinlichkeit ist die zweistufige Prüfstrategie sogar 47% effizienter.

⁶Effizienter bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Fehlerursache in einer kürzeren Zeit (32min statt 38,5min) gefunden wurde

6.7 Zusammenfassung Kapitel 6

In diesem Kapitel wurde die Entwicklung von Verfahren zur Ermittlung eines effizienten Prüfablaufs beschrieben. In einem intelligenten Diagnosesystem besteht die Notwendigkeit, aus der Menge möglicher Prüfungen jeweils die sinnvollste auszuwählen. Die richtige Auswahl der Prüfungen hat einen wesentlichen Einfluss auf die Effizienz der gesamten Fehlersuche. Das beschriebene Verfahren verwendet ein iteratives Vorgehen zur Eingrenzung der Fehlerursache. Dabei wird anhand des Wissens über die Fehlersymptome und das Fahrzeug zunächst eine initiale Prüfung ausgewählt. Anhand des Ergebnisses dieser Prüfung erfolgt eine Neubewertung der Fehlerkandidaten und möglicher sinnvoller Prüfungen. Für die Auswahl der zweiten Prüfung steht dadurch eine höhere Evidenz zur Verfügung. Dadurch verdichtet sich mit jedem Schritt das Wissen über die tatsächliche Fehlerursache.

Die Auswahl der Prüfungen erfolgt anhand von zwei Kriterien:

1. der zu erwartende Aufwand zur Durchführung der Prüfung
2. die kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit (die Wahrscheinlichkeit, dass eine der überprüften Komponenten defekt ist)

Auf Basis dieser beiden Bewertungskriterien wurde eine zweistufige Fehlersuchstrategie entwickelt. Im ersten Schritt werden dabei die verfügbaren Informationen soweit verdichtet, dass sich ein einzelner Fehlerkandidat herauskristallisiert. Im zweiten Schritt wird gezielt dieser TOP-Fehlerkandidaten überprüft. Die in diesem Kapitel beschriebenen Verfahren wurden in [KBMS] und [KBMa] zum Patent angemeldet.

Im Gegensatz zu den unflexiblen Fehlersuchprogrammen kann der Anwender bei dem beschriebenen dynamischen Prüfablauf Einfluss auf die Auswahl und Reihenfolge der Prüfungen nehmen. So können z. B. einzelne Prüfschritte vorgezogen, übersprungen oder zu einem späteren Zeitpunkt wiederholt werden.

Um eine Aussage über die Effizienz der zweistufigen Prüfstrategie machen zu können, wurde sie mit einer reinen aufwandsgetriebenen Fehlersuchstrategie sowie einer Fehlersuchstrategie, die ausschließlich die kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit berücksichtigt, verglichen. Das Ergebnis dieser Untersuchung zeigt einen klaren Vorteil für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren.

7. | Evaluierung des Diagnosesystems

Der Schwerpunkt der bisherigen Kapitel lag in der Beschreibung der Entwicklung eines neuartigen intelligenten Diagnosesystems. Bevor man sich entscheidet, ein neues System einzuführen, ist es notwendig, dieses zu bewerten. Anhand von Kriterien und Metriken können nach einer solchen Evaluierung Aussagen darüber getroffen werden, wie viel besser oder schlechter ein System im Vergleich zu einem anderen ist.

Die Einführung eines neuen Diagnosesystems bzw. die Erweiterung eines bestehenden Systems um neue Funktionalitäten ist nur sinnvoll, wenn sich dadurch deutliche Verbesserungen ergeben. Wie bereits in der Einleitung geschrieben wurde, ist das Ziel der entwickelten Verfahren die Erhöhung der Effizienz (vgl. Definition S. 2) der Fehlersuche mit Hilfe eines entsprechenden Diagnosesystems.

Das Ziel dieses Kapitels ist es, das im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelte System mit dem bisher in den Vertragswerkstätten der Volkswagen AG eingesetzten System (GFS) zu vergleichen. Das dafür entwickelte Evaluierungsverfahren ist im Abschnitt 7.1 beschrieben. Um die Allgemeingültigkeit und Anwendbarkeit des Verfahrens zu zeigen, wurden zwei zusätzliche Diagnosesysteme in die Bewertung einbezogen. Die vier Systeme sind im Abschnitt 7.2 beschrieben.

7.1 Verfahren zur Bewertung des Diagnosesystems

Die vier Diagnosesysteme, die in diesem Kapitel bewertet werden sollen, setzen grundlegend verschiedene Verfahren ein. Dadurch können die Systeme nicht unmittelbar miteinander verglichen werden. Aus diesem Grund kommt das in [MKF08] beschriebene dreistufige Evaluierungsverfahren zum Einsatz.

Stufe 1 – Konzeptbewertung: Ziel der Konzeptbewertung ist es, die dem System zugrundeliegenden Verfahren einzuschätzen. Innerhalb dieser Phase wird überprüft, ob die gewählten Verfahren für den oder die geplanten Einsatzbereiche wie Werkstätten oder Produktionsanlagen sinnvoll sind. Die Konzeptbewertung erfolgt auf Basis der Spezifikationen der einzelnen Funktionen und der das System umgebenden Prozesse. Dabei werden neben der technischen Umsetzbarkeit auch die Aufwände für die Einführung bzw. Migration sowie für die Erstellung und Pflege der Wissensbasis bewertet. Werden bei der Konzeptbewertung alle relevanten Qualitätsmerkmale berücksichtigt, ergibt diese Bewertungsstufe eine sehr umfassende Aussage über die theoretische Leistungsfähigkeit des Diagnosesystems.

Stufe 2 – Erprobung unter Realbedingungen: Für die Erprobung unter Realbedingungen müssen die Diagnosesysteme in einer möglichst vollständigen und werkstatttauglichen Implementierung vorliegen. Ziel dieser Untersuchung ist es zu bewerten, wie gut das System die Fehlersuche bei einem real vorliegenden Fehler unterstützt. Der Aufwand für die Durchführung eines Tests entspricht in etwa dem einer realen Fehlersuche in der Werkstatt und ist somit verhältnismäßig hoch. Pro Tag und Person können nur ca. 10 solcher Tests durchgeführt werden.

Stufe 3 – Erprobung mit Felddaten: Mit Hilfe der Erprobung mit Felddaten wird untersucht, wie gut das Diagnosesystem für reale Fehlersituationen geeignet ist. Dafür werden reale abgeschlossene Fehlerfälle mit Hilfe des zu untersuchenden Diagnosesystems nachgestellt und bewertet.

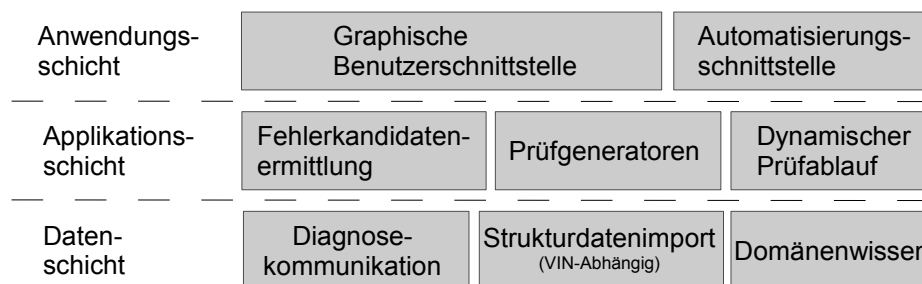


Abbildung 7.1.: Überblick der Softwarekomponenten von FiDis

Die Erprobung setzt voraus, dass eine ausreichend große Menge gut dokumentierter Diagnose- und Reparaturfälle vorliegt. Dafür kann z.B. die Dokumentation von Gewährleistungsreparaturen herangezogen werden. Die verwendete Menge willkürlich ausgewählter Falldaten sollte die Häufigkeit und Zusammensetzung realer Werkstattsituationen widerspiegeln. Durch diese Untersuchung kann (eine entsprechende Anzahl repräsentativer Fälle vorausgesetzt) eine Aussage über das tatsächliche Einsparpotential (z.B. Reduzierung der durchschnittlichen Fehlersuchzeit) getroffen werden.

Der Schwerpunkt dieses Kapitels ist der Vergleich des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Systems mit der als Stand der Technik geltenden GFS. Um zu zeigen, dass das verwendete dreistufige Evaluierungsverfahren für verschiedenartige Diagnosesysteme anwendbar ist, werden zwei weitere Systeme in die Bewertung aufgenommen. Die Evaluierung der beiden zusätzlichen Systeme erfolgt nicht in vollem Umfang. An den Stellen, an denen die zusätzlichen Systeme in die Bewertung einbezogen sind, ermöglicht dies jedoch eine bessere Einordnung der Ergebnisse, durch einen Vergleich mehrere Systeme.

Im Rahmen der Konzeptbewertung werden alle vier Diagnosesysteme bewertet und gegenübergestellt. Für die Erprobung unter Realbedingungen wurden nur die Systeme FiDis, GFS und Neucus bewertet (Beschreibung der Systeme im kommenden Abschnitt). Das konzeptionell beschriebene Diagnose Internetportal konnte nicht praktisch erprobt werden, da keine verwendbare Umsetzung der Wissensbasis zur Verfügung stand. Bei der Erprobung mit Felddaten wurden lediglich die Systeme FiDis und GFS verglichen. Es gibt zwar eine ähnliche Untersuchung mit Neucus in [Mül11] jedoch werden dort andere Fälle herangezogen, so dass die Ergebnisse nicht unmittelbar mit denen aus Abschnitt 7.5 verglichen werden können.

7.2 Beschreibung der zu untersuchenden Diagnosesysteme

Das fahrzeugindividuelle Diagnosesystem (FiDis)

Um die Verfahren aus den Kapiteln 4 bis 6 verwenden und bewerten zu können, wurden sie in Form von Softwaremodulen implementiert und zu einem modularen Diagnosesystem zusammengefügt. Das entstandene System mit dem Namen FiDis (für Fahrzeugindividuelles Diagnosesystem) besteht aus etwa 25.000 Zeilen Java-Code. Das System ist modular aufgebaut. Die Abbildung 7.1 stellt die drei Schichten der Software mit den jeweiligen Modulen dar. Die Module sind über eine Middleware miteinander verbunden. Die Module können entweder zusammen auf einem PC oder Laptop installiert werden oder auf mehrere Server verteilt werden. Die Benutzerinteraktion mit dem System erfolgt immer mit Hilfe eines Webbrowsers. Jedes Modul besitzt eine Konfigurationsdatei, mit deren Hilfe notwendige Parameter des Moduls eingestellt werden können.

<i>Art der Information</i>	<i>Beispiel</i>
vorgangsspezifische Informationen	Fahrgestellnummer (VIN) Ereignisspeichereinträge (Fehlersymptome)
fahrzeugspezifische Informationen (VIN-abhängig)	Bordnetzbeschreibung: (vgl. Abschnitt 4.2.1) - elektrische Komponenten - Leitungen, Stecker, etc.
baureihenspezifische Informationen	Beschreibung der Diagnosefunktionen (vgl. Abschnitt 4.2.2), Signalbeschreibungen (vgl. Abschnitt 5.4), Komponentenausfallwahrscheinlichkeiten (vgl. Abschnitt 4.2.4), Aufwand für den Aus- und Einbau von Komponenten (vgl. Abschnitt 6.3)

Tabelle 7.1.: Daten für das Diagnosesystem

Die Datenschicht enthält Module, welche notwendige Informationen aus unterschiedlichen Quellen aggregieren und der Applikation zur Verfügung stellen. Wie in Tabelle 7.1 dargestellt, lassen sich die Informationen in die drei Kategorien vorgangsspezifische Informationen, fahrzeugspezifische Informationen und baureihenspezifische Informationen einteilen. Vorgangsspezifische Informationen enthalten die konkreten Fehlersymptome und sind nur für den aktuellen Diagnosevorgang gültig. Sie werden über das Diagnosekommunikations-Modul aus dem Fahrzeug ausgelesen. Zur Kommunikation mit dem Fahrzeug greift das Diagnosekommunikations-Modul auf das Scan-Tool (vgl. Abschnitt 2.1.3) VAS5163 zurück. Das Scan-Tool liest alle relevanten Informationen (einschließlich der Fahrgestellnummer) aus dem Fahrzeug aus und speichert diese in einer Datei, welche durch das Modul eingelesen wird. Alternativ können die Symptome auch über die Benutzerschnittstelle eingegeben oder über die Automatisierungsschnittstelle aus einer Datenbank gelesen werden.

Die fahrzeugspezifischen Informationen sind für genau ein Fahrzeug mit einer bestimmten Fahrgestellnummer gültig. Sie enthalten die strukturbeschreibenden Daten und werden durch das Strukturdatenimport-Modul von einem Server oder aus dem lokalen Dateisystem geladen. Dafür muss das Modul zunächst die Fahrgestellnummer kennen, welche das Diagnosekommunikations-Modul zuvor aus dem Fahrzeug ausgelesen hat. Die strukturbeschreibenden Daten werden aus einer speziell strukturierten Datei ausgelesen. Das dritte Modul der Datenschicht stellt fahrzeugunabhängiges Domänenwissen zur Verfügung.

Aus den fallspezifischen Informationen und dem fahrzeugunabhängigen Domänenwissen wird eine Datenstruktur in Form eines Graphen (vgl. Abschnitt 2.2.2) befüllt. Jedes Element der elektrischen Strukturbeschreibung (z.B. Steuergeräte, Stecker, Sicherungen, ...) werden durch einen Knoten in diesem Graphen repräsentiert. Aus der Struktur des Graphen (gegeben durch die Menge der Kanten) ist ersichtlich, wie die Komponenten miteinander elektrisch verschaltet sind. Auch Informationen wie z.B. Bauteilbezeichnungen, Signale, Signalabhängigkeiten, Fehlerwahrscheinlichkeiten und Informationen über durchgeführte oder ausstehende Prüfungen werden in den Knoten des Graphen abgelegt. Die Daten aus diesem Graphen werden von den Modulen der Applikationsschicht weiterverarbeitet.

In der mittleren Schicht befindet sich die eigentliche Applikationslogik des Diagnosesystems. Die Funktionen der drei Module sind in den Kapiteln 4 bis 6 beschrieben.

Das Modul Fehlerkandidatenermittlung generiert aus dem Graphen, der die elektrische Struktur des repräsentiert ein initiales Bayes-Netz (vgl. Abschnitt 4.3). Im Anschluss daran wird das Bayes-Netz optimiert (vgl. Abschnitt 4.4). Zur Ermittlung der Fehlerwahrscheinlichkeiten werden die A-Priori-Wahrscheinlichkeiten (Domänenwissen) sowie die Zustände der Symptomknoten (vorgangsspezifische Information, vgl. Abschnitt 4.7.1) in das Bayes-Netz eingebracht. Nach der Berechnung des Netzes ist die initiale Fehlerwahrscheinlichkeit aller Komponenten bekannt. Die Ergebnisse werden in den Knoten des Graphen sowie in der dynamischen Fehlerkandidatenliste

Fehlertext	Wahrscheinlichkeit	DTC	Fehler vorhanden	kein Fehler vorhanden	unbekannt
Funktionseinschränkung durch Unterspannung	0.0	446	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Funktionseinschränkung durch Überspannung	0.0	447	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Klemme 30	0.0	926	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Klemme 30 rechts	0.0	927	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bordspannung Klemme 50	0.0	1049	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kraftstoffpumpenrelais-J17	0.0020	1259	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ansteuerung Relais für Spannungsversorgung Klemme 75X	0.213	187	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ansteuerung 1 Relais für Spannungsversorgung Klemme 50	0.213	188	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lampe für Abblendlichtscheinwerfer rechts-M31	0.145	979	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lampe für Fernlichtscheinwerfer rechts-M32	0.145	1499	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lampe für Blinklicht vorne rechts-M7	0.155	1497	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lampe für Standlicht vorne links-M1	0.125	2394	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Klemme 31	0.0	918	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lampe für Rückfahrlicht rechts-M17	1.0	1519	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lampe für Blinklicht hinten rechts-M8	0.299	1505	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Dimmung für Innenlicht	0.299	1701	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Klemme 58d - Dimmung Innenlicht	0.541	1064	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Abbildung 7.2.: FiDis: Symptomeingabe

gespeichert. Sollten sich wie Werte im Graphen ändern (z.B. in Folge einer durchgeführten Prüfung vgl. Modul dynamischer Prüfablauf), erfolgt eine Neuberechnung des Bayes-Netzes.

Das Modul Prüfgenerator benötigt neben der Fehlerkandidatenliste ebenfalls den Graphen, der die elektrische Struktur repräsentiert. Um Signalprüfungen generieren zu können, werden die entsprechenden Signale (Domänenwissen) innerhalb des Graphen propagiert (vgl. Abschnitt 5.4.1) und an die Knoten angetragen. Die verschiedenen Prüfgeneratoren innerhalb des Moduls durchsuchen anschließend den Graphen, um parametrierbare Prüfanweisungen zu generieren. Folgende Prüfgeneratoren sind umgesetzt:

- Durchgangsprüfungen
- Spannungsprüfungen
- Masseprüfungen
- Komponentenprüfungen

IFID	Fehlerkandidaten	Fehler Wahrsch.	n.i.O.	i.O.	???
Cluster 1: DTC 1497 Lampe für Blinklicht vorne rechts-M7 BSG26V.1.NW					
5934	Lampe Halogenscheinwerfer rechts (Top-Kandidat)	0.712	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6645	GND Scheinwerfer rechts	0.163	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5935	STK am Scheinwerfer rechts	0.138	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6162	STK am BordnetzSTG	0.111	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
7051	Splice im Kabelstrang	0.065	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
8084	BTL-Leitung	0.015	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Cluster 2: DTC 1519 Lampe für Rückfahrlicht rechts-M17 BSG26V.1.NW					
6840	automatisch_abblendbarer_Innenspiegel	0.515	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2773	Koppelstecker Heckklappe_1	0.262	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6841	Stecker Innenspiegel	0.156	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2805	BTL-Leitung	0.017	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
8076	BTL-Leitung	0.017	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
bereits geprüfte Komponenten:					
2765	Lampe für Rückfahrlicht	0.000	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2766	Stecker für Rückfahrlicht	0.000	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Abbildung 7.3.: FiDis: Geclusterte Fehlerkandidatenliste

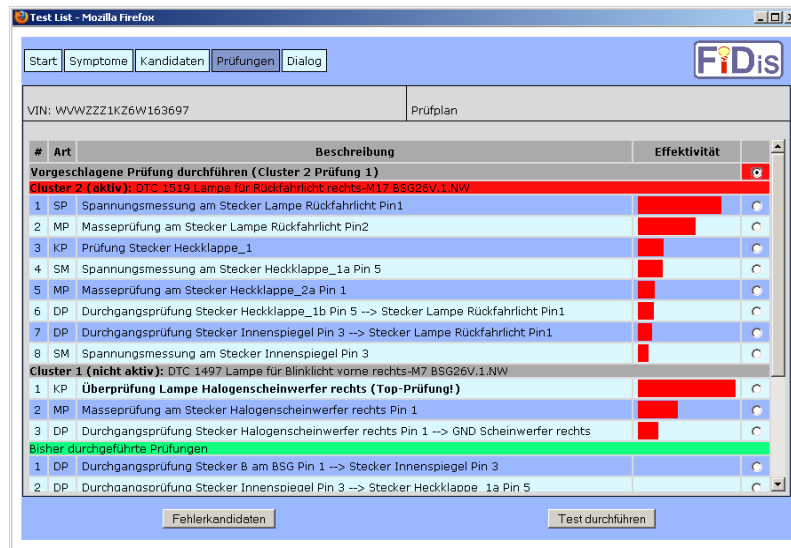


Abbildung 7.4.: FiDis: Dynamischer Prüfplan

Das Modul Dynamischer Prüfablauf ermittelt die Gewichtungsfaktoren (Aufwand pro Prüfschritt, kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit und Informationsgewinn) für alle generierten Prüfungen (vgl. Abschnitt 6.3). Gemäß der zweistufigen Prüfstrategie (vgl. Abschnitt 6.4) wird anschließend der Prüfplan generiert und zur Ausführung gebracht. Dies beinhaltet auch die Ermittlung des Top-Fehlerkandidaten sowie die Auswahl des nächsten Prüfschritts. Sobald eine Prüfung durchgeführt wurde und ein Ergebnis vorliegt, sorgt das Modul für eine Aktualisierung der Fehlerkandidatenliste, der Prüfungen sowie des Prüfplans.

Mit Hilfe des Moduls graphische Benutzerschnittstelle kann das System komfortabel bedient werden. Dies ist z.B. für einen Einsatz in einer Werkstatt sowie für die meisten im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen notwendig. Die Benutzerschnittstelle ist mit Java-Server-Pages realisiert und wird mit einem Webbrowser bedient. Die Abbildung 7.2 zeigt einen Bildschirmdialog zur manuellen Symptomeingabe. Bei einer Diagnosesitzung am Fahrzeug kann darauf verzichtet werden, wenn ein Scan-Tool verwendet wird. Mit Hilfe des Bildschirmdialogs können die Symptome jedoch auch dann kontrolliert und verändert werden. Die Abbildung 7.3 zeigt die gewichtete Fehlerkandidatenliste als Ergebnis der wahrscheinlichkeitsbasierten

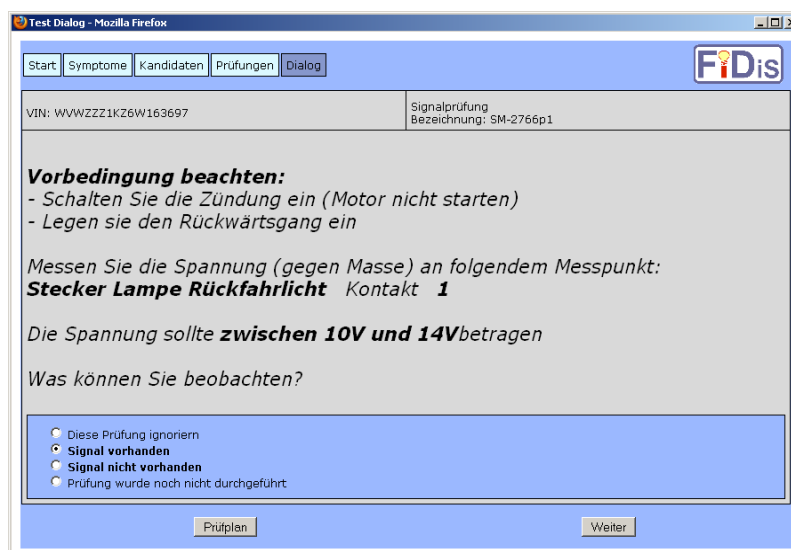


Abbildung 7.5.: FiDis: Prüfanweisung Signalprüfung

Fehlerkandidatenermittlung. In diesen Bildschirmdialog kann jederzeit gewechselt werden. Der Anwender kann darüber die Fehlerwahrscheinlichkeit einzelner Bauteile sehen und Befunde (Bauteil i.O., Bauteil n.i.O.) eingeben.¹

Die Abbildung 7.4 zeigt den dynamischen Prüfplan. Genau wie die Fehlerkandidatenliste in Abbildung 7.3 ist der Prüfplan in zwei Cluster eingeteilt (vgl. Abschnitt 6.4.3). Das System wählt eine Prüfung automatisch aus. Der Anwender kann über diesen Bildschirmdialog jedoch bewusst eine andere auswählen. In Abbildung 7.5 ist eine Prüfanweisung zur Durchführung einer Spannungsprüfung dargestellt. Der Bildschirmdialog verwendet parametrierbare Prüfanweisungen, welche durch Informationen aus dem Prüfgenerator für Spannungsprüfungen ergänzt wurden. Wenn nach Eingabe des Ergebnisses auf *Weiter* geklickt wird, erscheint automatisch die nächste Prüfung. Durch einen Klick auf *Prüfplan* kann man zurück in die Prüfplanansicht und von dort aus in die Fehlerkandidatenliste und zurück in Symptomansicht wechseln.

Die Automatisierungsschnittstelle stellt eine weitere Möglichkeit zur Nutzung des Diagnosesystems dar. Über diese Schnittstelle kann auf alle Funktionen des Diagnosesystems zugegriffen werden. Sie wird z. B. für die automatische Erprobung mit Felddaten (vgl. Abschnitt 7.5) verwendet. Dabei werden nacheinander automatisch unterschiedliche Fälle aus einer Datenbank ausgelesen und Fehlerkandidaten sowie Prüfungen ermittelt. Diese werden jedoch nicht zur Anzeige gebracht sondern wiederum in eine Datenbank geschrieben. Mit Hilfe von Datenbank-Tools lassen sich die Ergebnisse im Nachgang auswerten.

Diagnose Internetportal

Eine sehr einfache Möglichkeit eines wissensbasierten Diagnosesystems ist ein Internetportal mit Forum, Wiki und einer Suchfunktion. Systeme dieser Art sind in anderen Bereichen, (z. B. PC-Hard- und Software, Mobiltelefone, Druckern oder Netzwerkroutern, ...) weit verbreitet.

Bei der Verwendung für die Fahrzeugdiagnose kann der Mechaniker bei der Fehlersuche ein OBD-Scantool (vgl. Abschnitt 2.1.3) verwenden, um die DTCs aus dem Fahrzeug auszulesen. Diese können anschließend zusammen mit Schlagworten, welche die Fehlersituation weiter beschreiben, in das Suchfeld des Diagnose Internetportals eingegeben werden². Das Ergebnis sind dann Beiträge (Texte), welche das vorliegende oder ähnliche Probleme beschreiben. Der Inhalt des Wikis und der Foren (die Wissensbasis des Systems) kann von speziellen Autoren und Forenadministratoren (z. B. Angestellte des Automobilherstellers) gefüllt und redaktionell gepflegt werden. In den meisten Fällen ist es darüber hinaus möglich und sogar gewünscht, dass Anwender ihre eigenen Erfahrungen im System dokumentieren und damit anderen zur Verfügung stellen.

Es gibt bereits heute einige Foren im Internet, die sich mit der Diagnose und Reparatur von Fahrzeugen beschäftigen. Die Beiträge darin werden i. d. R. von Anwendern und nicht von den Experten des jeweiligen Fahrzeugherstellers verfasst. Dies führt dazu, dass die Qualität der Beiträge vielfach sehr weit auseinander geht, was dazu führt, dass viele Beiträge nicht verwendbar sind. Für den folgenden konzeptionellen Vergleich zwischen der GFS und dem Diagnose Internetportal wird davon ausgegangen, dass Qualität und Umfang der Wissensbasen vergleichbar sind. Dies kann erreicht werden, indem die Wissensbasis des Diagnose Internetportals von den gleichen Experten erstellt und gepflegt wird, die sonst die Wissensbasis der GFS pflegen würden.

Neucus

Neucus ist ein Diagnosesystem auf Basis neuronaler Modelle. Es wurde von Tobias C. Müller entwickelt und in [Mül11] beschrieben. Genau wie FiDis ist Neucus ein intelligentes

¹Dies ist z. B. notwendig wenn der Mechaniker bereits selbständig Prüfungen durchgeführt hat und die dadurch erlangten Erkenntnisse dem System mitteilen will.

²Es ist auch vorstellbar, dass die DTCs aus dem Scantool auf Wunsch automatisch an die Suchfunktion des Diagnose Internetportal übergeben werden

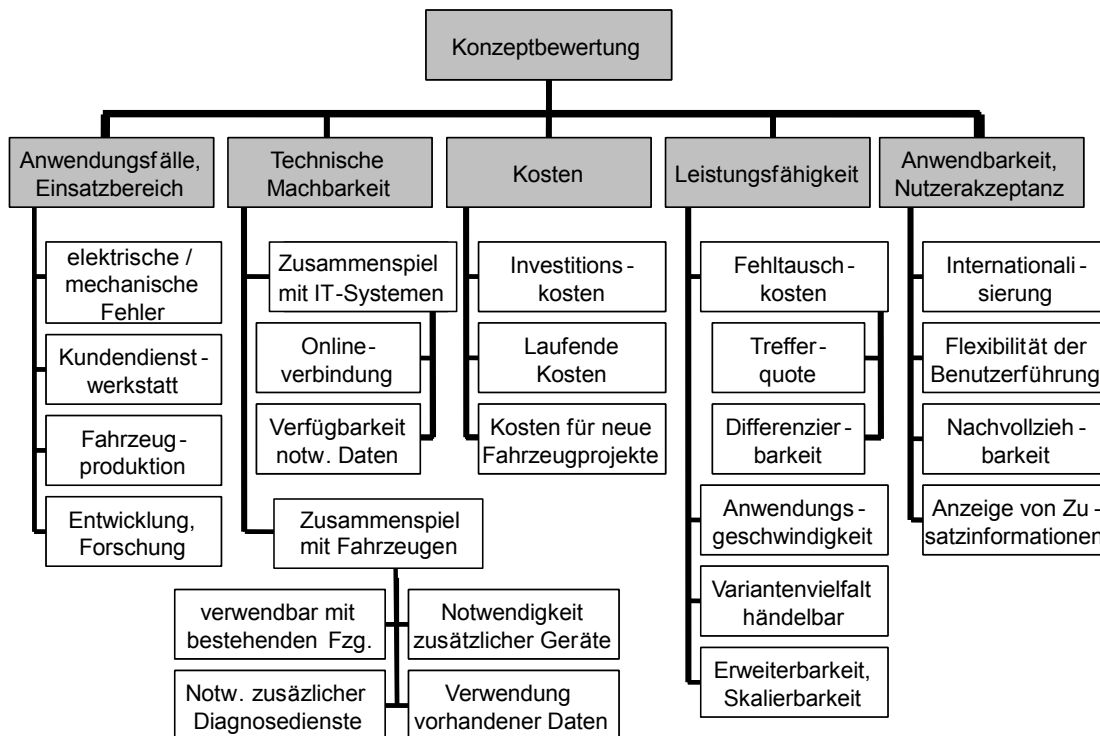


Abbildung 7.6.: Kriterien der Konzeptbewertung [MKF08]

Diagnosesystem, das nicht auf Expertenwissen angewiesen ist. Neucus ist ein selbstlernendes System, das aus erfolgreichen Reparaturvorgängen lernt. Dafür werden große Mengen an Falldaten benötigt. Die benötigten Falldaten werden bereits heute in den Servicewerkstätten großer Automobilkonzerne für die Dokumentation der Serviceleistungen und Reparaturvorgänge erfasst. Neucus wurde mit Daten aus dem Datawarehouse der Volkswagen Servicewerkstätten trainiert. Abhängig von den Fehlersymptomen (DTCs und Kundenbeanstandungen) schlägt es Ersatzteile und Reparaturhandlungen (abrechenbare Arbeitspositionen) vor. Das System besitzt kein Wissen über den inneren Aufbau und Komponenten eines Fahrzeugs. Es erkennt jedoch die Ähnlichkeit des Reparaturfalls (ähnliches Fahrzeug, ähnliche Symptome) zu anderen erfolgreichen Reparaturfällen aus der Vergangenheit. Es wird davon ausgegangen, dass die gleichen Ersatzteile und Reparaturhandlungen auch in diesem Fall erfolgreich sein werden.

Geführte Fehlersuche (GFS)

Die Geführte Fehlersuche ist ein wissensbasiertes Diagnosesystem, dessen Wissensbasis auf Expertenwissen basiert. Im Gegensatz zu dem in dieser Arbeit entwickelten Diagnosesystem ist bei der GFS die gesamte Fehlersuchstrategie für jeden einzelnen Fehlerfall in Form genau festgelegter Abläufe in den Fehlersuchprogrammen hinterlegt. Die GFS besitzt also keine eigene Intelligenz, sondern ist ausschließlich ein Ablaufsystem für die Fehlersuchprogramme, die von Experten erstellt wurden. Die Funktion des Systems wurde bereits im Abschnitt 2.1.3 beschrieben.

7.3 Konzeptbewertung

Im Folgenden werden die Konzepte hinter beschriebenen Diagnosesystemen verglichen und bewertet. Dabei wird jedes der Systeme (FiDis, Internet Wissensbasis, Neucus) separat mit dem Stand der Technik (GFS) verglichen. In [MKF08] wurden 5 Hauptkriterien mit insgesamt 25 Unterkriterien zur Konzeptbewertung von Diagnosesystemen identifiziert. Die Abbildung 7.6 stellt diese graphisch dar.

Bewertung	Bedeutung
⊕⊕	Das System ist bei diesem Kriterium wesentlich besser als die GFS
⊕	Das System hat bezüglich dieses Kriteriums Vorteile gegenüber der GFS
⊙	Die Stärken und Schwächen beider Systeme sind vergleichbar
⊖	Das System hat bezüglich dieses Kriteriums Schwächen gegenüber der GFS
⊖⊖	Das System stellt bezüglich dieses Kriteriums keine Alternative zur GFS dar (KO-Kriterium)

Tabelle 7.2.: Bewertung des zu untersuchenden Systems im Vergleich zum Stand der Technik

Jedes Kriterium sollte separat bewertet werden. Dafür kann z.B. das Prinzip der Schulnoten (1 bis 6) oder eine Prozentskala (100% – Kriterium zur vollsten Zufriedenheit erfüllt) verwendet werden. In der vorliegenden Arbeit wird ein fünfstufiges Bewertungsschema verwendet, das in Tabelle 7.2 dargestellt ist.

In den kommenden Abschnitten werden für alle drei Systeme jeweils alle 25 Kriterien bewertet und mit der GFS verglichen. Dadurch können die konzeptbedingten Stärken und Schwächen der Systeme herausgestellt werden. Auf einen Vergleich der Systeme untereinander wird verzichtet.

7.3.1 Vergleich FiDis mit GFS

Anwendungsfälle und Einsatzbereich

Es gibt verschiedene Einsatzbereiche für Diagnosesysteme. Der wichtigste Einsatzbereich sind die Kundendienstwerkstätten. Aber auch in der Produktion, z.B. in der Nacharbeit, wird heute die GFS eingesetzt. Gerade bei Fahrzeug-Neuanläufen kann die GFS meistens nur bedingt unterstützen, da die notwendigen Fehlersuchprogramme noch nicht vollständig sind. Während der Entwicklung, z.B. bei der Fahrzeuginbetriebnahme im Versuchsbau, kann die GFS normalerweise nicht verwendet werden. Ein strukturbasiertes Diagnosesystem wie FiDis kann dagegen bereits sehr früh im Produktentstehungsprozess eingesetzt werden. Die einzige Voraussetzung ist, dass die Bordnetz-Varianten (CAD-Daten) und der Verbauzustand des Fahrzeugs (Variante) elektronisch beschrieben sind. Dadurch lässt sich FiDis z.B. bereits für den Aufbau von Null-Serien-Fahrzeugen verwenden.

Die Bewertung der vier Unterkriterien aus dem Bereich Anwendungsfälle und Einsatzbereiche (Abbildung 7.6) ist in der Tabelle 7.3 dargestellt. Die Zeilen entsprechen jeweils einem Unterkriterium. Die Bewertung erfolgt gemäß Tabelle A.20. Der Einsatz von FiDis bringt Vorteile in den Kundendienstwerkstätten, in der Produktion sowie in der Fahrzeugentwicklung.

FiDis wurde für die Diagnose elektrischer Systeme entwickelt. Mit der GFS ist es auch möglich Fehler in mechanischen oder hydraulischen Systemen zu diagnostizieren, soweit diese durch einen

Kriterien	Beschreibung	Bewertung
elektrische oder mechanische Fehler	Es lassen sich nur elektrische Fehler diagnostizieren	⊖
Kundendienstwerkstatt	Die Diagnose erfolgt fahrzeugindividuell d. h. alle elektrischen Systeme werden berücksichtigt, konkrete, detaillierte Prüfanweisungen, optimierte Prüfreihenfolge	⊕⊕
Fahrzeugproduktion	Zusätzlich zu den Argumenten der vorherigen Zeile: Wissensbasis zu Beginn der Serienfertigung vollständig verfügbar hohe Flexibilität bei der Verwendung des Systems	⊕⊕
Entwicklung, Forschung	Wissensbasis lässt sich auch für Vorserienstände automatisch generieren	⊕

Tabelle 7.3.: Bewertung der Anwendungsfälle und Einsatzbereiche von FiDis gegenüber der GFS

DTC in einem Steuergerät angezeigt werden. Der Anteil dieser Art von Fehlern an der Gesamtzahl der durch die On-Board-Diagnose erkennbaren Fehler ist jedoch sehr gering. Dadurch wird die funktionelle Beeinträchtigung von FiDis verglichen mit der GFS für diesen Fall als gering (⊖) bewertet.

Technische Machbarkeit

Die Bewertung der technischen Machbarkeit ist notwendig, um abschätzen zu können, ob und mit welchem Aufwand ein System eingesetzt werden kann. Ein Kriterium ist die Integrierbarkeit in bestehende IT-Systeme und Infrastrukturen. Die Testsysteme in den VW-Werkstätten (vorwiegend VAS5051B) ähneln von der Hardwareausstattung einem Laptop mit Intel-kompatiblen x86-Prozessor. Als Betriebssystem kommt Microsoft Windows zum Einsatz. FiDis kann genau wie die GFS mit diesen Geräten verwendet werden. Die GFS benötigt im Gegensatz zu FiDis eigentlich keine Onlineverbindung. Da jedoch immer mehr Funktionen z.B. das Anlernen der Wegfahrsperrung oder das Codieren von Steuergeräten nur noch mit Onlineverbindung möglich sind, sind bereits heute nahezu alle Testsysteme mit dem Intranet verbunden. Die Notwendigkeit einer Onlineverbindung für FiDis stellt somit keine Benachteiligung dar.

FiDis wurde mit dem Ziel entwickelt, nur Daten zu verwenden, die bereits vorhanden sind oder automatisch generiert werden können. Dies ist die große Stärke gegenüber der GFS, die manuell erstelltes Expertenwissen erfordert. Für die Verwendung von FiDis müssen dadurch keine neuen Daten erzeugt werden.

An das zu diagnostizierende System stellt FiDis keine Anforderungen, die über die der GFS hinausgehen. Es ist jedoch notwendig, dass ein fahrzeugindividueller Datensatz mit einer elektrischen Strukturbeschreibung vorliegt. Die Generierung dieser Daten wurde mit dem Modelljahr 2006 für die VW Golfs aus dem Produktionsstandort Wolfsburg begonnen. Bis heute werden diese Daten jedoch nicht in allen Werken generiert. FiDis kann somit nicht für alle Fahrzeuge, vor allem nicht für ältere, verwendet werden. Dieses Problem bestand bei der Einführung der GFS gleichermaßen. Viele Fahrzeuge aus den 1990er Jahren können bis heute nicht mit der GFS diagnostiziert werden. Die Bewertung der technischen Machbarkeit ist in Tabelle 7.4 dargestellt.

Kriterien	Beschreibung	Bewertung
Onlineverbindung	Die für FiDis notwendige Onlineverbindung wird auch von der GFS in zunehmendem Maße benötigt	⊖
Verfügbarkeit notw. Daten	FiDis verwendet die verfügbaren Daten wesentlich effizienter, da sie nicht manuell aufbereitet werden müssen	⊕
verwendbar mit bestehenden Fahrzeugen	Nicht für alte Fahrzeuge geeignet, oder zusätzlicher Aufwand notwendig	⊖
Notw. zusätzlicher Diagnosedienste	Es werden keine zusätzlichen Diagnosedienste im Fahrzeug benötigt	⊖
Notw. zusätzlicher Geräte	Es werden keine zusätzlichen Geräte benötigt	⊖
Verwendung vorhandener Daten	FiDis verwendet zus. Diagnosedaten wie z.B. die Fehlerart häufiger als die GFS	⊕

Tabelle 7.4.: Bewertung der technischen Machbarkeit von FiDis gegenüber der GFS

Kosten

Die Kosten sind eines der wichtigsten Bewertungskriterien bei der Einführung einer neuen Technik. Kosten teilen sich auf in einmalige Kosten, die bei der Einführung des Systems anfallen, und Kosten für den laufenden Betrieb.

Diagnosesysteme wurden aus ökonomischen Gründen in den Werkstätten eingeführt. Sie sollen in den Werkstätten den Aufwand für die Fehlersuche und dadurch auch die Gewährleistungskosten

minimieren. Es sind drei Optionen vorstellbar, bei denen sich die Einführung eines neuen Diagnosesystems lohnt:

1. Zusätzliche Unterstützung bei der Fehlersuche z.B. in Fehlersituationen, die heute noch nicht von den Diagnosesystemen unterstützt werden (Einsparungen in den Werkstätten)
2. Verringerung des Aufwandes für die Erstellung und Pflege der Wissensbasis (Einsparung für die Volkswagen AG)
3. Kombination aus den beiden ersten Punkten (Win-Win-Situation)

Beim Einsatz von FiDis fallen keine nennenswerten Investitionskosten für die Werkstätten an, da das System auf den bestehenden Testsystemen läuft. Auf der Seite der Volkswagen AG werden mit dem Einsatz des neuen Systems Investitionen für die nötige Infrastruktur (Server) nötig. Für die Software fallen keine Lizenzkosten an. Es ist ein einmaliger Aufwand notwendig, um die bestehende Software in ein Produktivsystem zu überführen und in die bestehende IT-Landschaft zu integrieren. Es ist weiterhin notwendig, die Systeme der Produktion dahingehend zu erweitern, dass sie die fahrzeugindividuellen Strukturdaten erzeugen und zur Verfügung stellen³. Das Datawarehouse, mit dem die Daten abgeschlossener Reparaturfälle ausgewertet werden, muss regelmäßig die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Komponenten berechnen⁴. Zusammenfassend wird das Kriterium Investitionskosten in der Tabelle 7.5 auf Grund des verhältnismäßig geringen Aufwandes neutral (⊙) bewertet.

Die Kosten für den Betrieb eines Diagnosesystems werden hauptsächlich durch den Aufbau und die Pflege der Wissensbasis verursacht [PZMH01]. Im Falle der GFS bedeutet dies für einen Automobilhersteller, dass er permanent ein oder mehrere Teams aus Experten vorhalten muss. Diese müssen für jedes neue Fahrzeugprojekt oder System alle notwendigen Informationen beschaffen und für alle relevanten Fehler passende Fehlersuchprogramme schreiben. Beim Einsatz von FiDis entfällt dieser Aufwand nahezu vollständig, da keine Fehlersuchprogramme benötigt werden. In der Tabelle 7.5 ist deshalb ein deutlicher Vorteil (⊕⊕) für die laufenden Kosten ausgewiesen.

Beim Einsatz der GFS entstehen die höchsten Kosten bei der Einführung neuer Fahrzeugprojekte und neuer Systeme (z. B. neue Motoren). Dann müssen alle entsprechenden Fehlersuchprogramme neu erstellt oder bestehende abgewandelt werden. Beim Einsatz von FiDis entfallen diese Kosten vollständig. In der Tabelle 7.5 ist diese Kosteneinsparung deshalb mit ⊕⊕ bewertet.

Kriterien	Beschreibung	Bewertung
Investitionskosten	keine signifikanten Investitionen nötig	⊙
laufende Kosten	die manuelle Pflege der Wissensbasis entfällt nahezu vollständig	⊕⊕
Kosten für neue Fahrzeugprojekte	um die gleiche Qualität mit einer GFS zu erreichen, wäre wesentlich mehr Aufwand nötig	⊕⊕

Tabelle 7.5.: Bewertung der Kosten von FiDis gegenüber der GFS

Leistungsfähigkeit

Die Leistungsfähigkeit eines Diagnosesystems gibt an, wie gut es den Mechaniker bei der Suche nach der Ursache eines Fehlers unterstützt. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Mechaniker irgendwann jedes Problem findet. Wenn dies jedoch erst nach mehreren Reparaturversuchen geschieht, entstehen zusätzliche Kosten und der Kunde wird unzufrieden. Kosten durch missglückte Reparaturversuche sollen mit Hilfe der Diagnosesysteme minimiert werden. Die Anzahl missglückter Reparaturversuche wird durch die Trefferquote und die Differenzierbarkeit der Fehlerkandidaten beeinflusst.

³ist in einigen Werken der Volkswagen AG bereits seit 2006 erfolgt

⁴erfolgt bereits heute in ähnlicher Form

Die Trefferquote gibt an, bei wie viel Prozent der Fehler das System die richtige Diagnose stellt. Systeme, die häufig keine oder falsche Fehlerkandidaten ausgeben, haben eine geringe Trefferquote. Die Differenzierbarkeit der Fehlerkandidaten (auch als durchschnittliche Diagnosetiefe bezeichnet) gibt die Präzision der Diagnoseaussage an. Eine Aussage wie: „Elektrischer Fehler im System XYZ“ mag korrekt sein, hilft jedoch wenig. Idealerweise sollte das System immer die kleinste tauschbare Einheit z. B. einen konkreten Leitungsabschnitt oder einen Stecker ausgeben.

Die theoretische Leistungsfähigkeit der GFS ist sehr hoch. Wenn der Autor das zu diagnostizierende System sehr genau kennt und eine optimale Fehlersuchstrategie ermittelt hat, die alle Fehlerfälle abdeckt, kann die GFS den Mechaniker optimal unterstützen. Der Autor kennt jedoch nicht die konkrete Fahrzeugvariante und muss das Fehlersuchprogramm deshalb möglichst allgemeingültig schreiben. Auch ist es den Autoren oft nicht möglich, alle Fehler durch Fehlersuchprogramm abzudecken, so dass sie sich auf Schwerpunkte konzentrieren müssen. Wie dies in der Praxis geschieht, ist z. B. in [Hei06] beschrieben. Dazu kommt, dass ein manueller Erstellprozess immer fehleranfällig ist und die Verifikation nur stichprobenartig erfolgt. Im praktischen Einsatz ist die GFS deshalb im Bezug auf Trefferquote und Differenzierbarkeit bei Weitem nicht optimal.

Hinsichtlich der Differenzierbarkeit ist ein System wie FiDis, das jeden Leitungsabschnitt und jede Komponente separat betrachtet, sehr gut. Dafür muss dem System jedoch die exakte Verbauvariante bekannt sein. Die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung, die nach jedem Prüfschritt eine Neuberechnung durchführt, sorgt für eine sehr hohe Trefferquote. Vor allem bei einem Fehlerschauer (mehrere DTCs, die eine gemeinsame Ursache haben, Def. S. 7) kann das Bayes-Netz in FiDis seine Stärken gegenüber der GFS ausspielen. Bei der GFS werden in diesem Fall mehrere unabhängige Fehlersuchprogramme geladen, wohingegen das Bayes-Netz die Fehlerkandidaten ermittelt, welche als gemeinsame Ursache in Frage kommen. Die Fehlerkandidatenermittlung in FiDis funktioniert jedoch nur, wenn es sich um elektrische Fehler handelt, andernfalls werden keine Kandidaten ermittelt. Dadurch ist die Trefferquote am Ende nicht besser als die der GFS. Eine wirkliche Erhöhung der Trefferquote würde sich erst bei einer geschickten Kombination der beiden Verfahren ergeben, da sich dadurch die jeweiligen Schwächen ausgleichen ließen.

Ein weiteres Kriterium zur Bewertung der Leistungsfähigkeit ist Anwendungsgeschwindigkeit. Beide Systeme sind performant genug, um ein zügiges Arbeiten zu ermöglichen. Bei modellbasierten Diagnoseverfahren ist dies oft nicht gegeben. FiDis ist durch seinen modularen Aufbau sehr gut erweiterbar und skalierbar. Den größten Vorteil im Bezug auf die Leistungsfähigkeit hat FiDis gegenüber der GFS durch die Tatsache, dass es mit einer beliebigen Variantenvielfalt umgehen kann. Bei der GFS steigt der Erstellungsaufwand linear bis exponentiell mit jeder neuen Variante an. Bei FiDis bleibt der Aufwand dagegen konstant. Die Bewertung der Leistungsfähigkeit gegenüber der GFS ist in Tabelle 7.6 dargestellt.

Kriterien	Beschreibung	Bewertung
Trefferquote	Beide Systeme besitzen eine gute Trefferquote, auch wenn diese bei der GFS durch einen hohen Aufwand erkauft wird.	⊙
Differenzierbarkeit	FiDis kann stets bis zur kleinsten tauschbaren Einheit differenzieren	⊕⊕
Anwendungsgeschwindigkeit	Beide Systeme sind performant genug um ein zügiges Arbeiten zu ermöglichen.	⊙
Variantenvielfalt beherrschbar	FiDis kann im Gegensatz zur GFS ohne zusätzlichen Aufwand mit einer beliebigen Variantenvielfalt umgehen	⊕⊕
Erweiterbarkeit, Skalierbarkeit	FiDis ist ein leistungsfähiges offenes System. Alle Rechte liegen bei der Volkswagen AG.	⊕

Tabelle 7.6.: Bewertung der Leistungsfähigkeit von FiDis gegenüber der GFS

Anwendbarkeit und Nutzerakzeptanz

Für einen Fahrzeughersteller, der seine Produkte weltweit vertreibt, ist es besonders wichtig, auch den Service weltweit gewährleisten zu können. Dafür ist es notwendig, dass das Diagnosesystem in allen relevanten Landessprachen zur Verfügung steht. Damit die GFS z.B. in englisch- oder spanischsprachigen Ländern verwendet werden kann, müssen alle Bildschirmdialoge in allen Fehlersuchprogrammen übersetzt werden. Auch wenn die Bildschirmdialoge oft sehr ähnlich sind und sich nur in einzelnen Bezeichnungen oder Werten unterscheiden, ist die Übersetzung sehr aufwändig und kann auch zu Fehlern und Missverständnissen in einzelnen Sprachvarianten führen.

FiDis verwendet für die Bildschirmdialoge das Konzept der parametrierbaren Prüfanweisungen. Dabei gibt es nur eine überschaubare Anzahl an Dialog-Templates mit Platzhaltern, die situationsabhängig mit Werten und Bezeichnungen befüllt werden. Der Aufwand für eine Internationalisierung ist bei FiDis wesentlich geringer als bei der GFS. Es müssen lediglich die Dialog-Templates, die Bauteil- sowie die Signalbezeichnungen in die jeweilige Landessprache übersetzt werden. Auch aus Sicht der Qualitätssicherung ist dies ein deutlicher Vorteil, da die Wahrscheinlichkeit von Übersetzungsfehlern wesentlich geringer ist und diese darüber hinaus einfacher gefunden werden können. Der Softwaredemonstrator FiDis unterstützt zurzeit deutsch und englisch abhängig von der im Webbrowser eingestellten Sprache.

Ein weiteres Bewertungskriterium ist die Flexibilität der Benutzerführung des Diagnosesystems. Bei der GFS wird durch die Fehlersuchprogramme dem Anwender ein starrer Ablauf vorgegeben. Es müssen immer alle vorherigen Prüfschritte eines Fehlersuchprogramms durchgeführt werden, um zu einer bestimmten Prüfung zu gelangen. Auch wenn der Mechaniker bereits weiß, dass der Prüfschritt keinen sinnvollen Beitrag zur Fehlereingrenzung leisten wird, kann er ihn nicht überspringen. In FiDis kann der Anwender jederzeit Einfluss auf die Reihenfolge der Prüfungen nehmen. Es besteht die Möglichkeit, vorgeschlagene Prüfungen zu überspringen oder auf „ignorieren“ zu setzen, damit sie nicht erneut vom System vorgeschlagen werden. Über die Prüfplanansicht kann der Anwender Prüfungen auswählen, die das System auf Grund der geringen berechneten Effektivität nicht vorgeschlagen hätte. Dies kann sinnvoll sein, wenn der Mechaniker durch seine Erfahrungen oder nach telefonischer Rücksprache mit dem Technical Servicecenter von VW andere Prüfungen als die vorgeschlagenen durchführen möchte. Auch in diesem Fall wird er durch die automatisch generierten Prüfanweisungen mit ihren zusätzlichen Detailinformationen unterstützt. Über die Prüfplanansicht können auch bereits durchgeführte oder zuvor übersprungene Prüfungen erneut gestartet werden, ohne den gesamten Prüfablauf zu wiederholen, wie dies bei der GFS der Fall wäre.

Von besonderer Bedeutung für die Benutzerakzeptanz ist die Anzeige von Zusatzinformationen. Dies sind Informationen, die über die eigentliche Prüfanweisung hinausgehen und es dem

Kriterien	Beschreibung	Bewertung
Internationalisierung	Bei der GFS müssen alle Fehlersuchprogramme übersetzt werden. FiDis ist wesentlich einfacher an unterschiedliche Landessprachen anzupassen.	⊕⊕
Flexibilität der Benutzerführung	Durch das Überspringen vorgeschlagenen Prüfungen und die manuelle Auswahl von Prüfungen ist der Anwender mit FiDis wesentlich flexibler bei der Fehlersuche.	⊕
Nachvollziehbarkeit	Beide Systeme bieten die Möglichkeit, Prüfungen gut nachvollziehbar zu gestalten.	⊙
Anzeige von Zusatzinformationen	Durch die automatische Verknüpfung von Komponenten mit zugehörigen Zeichnungen sowie der Möglichkeit einer automatischen Stromlaufplangenerierung stehen bei FiDis i. d. R. mehr Zusatzinformationen zur Verfügung	⊕

Tabelle 7.7.: Bewertung der Anwendbarkeit und Nutzerakzeptanz von FiDis gegenüber der GFS

Anwender ermöglichen, das System und das Problem besser zu verstehen. Bei der GFS werden die Zusatzinformationen von den Autoren eingegeben. Typische Beispiele sind Abbildungen von Verbauorten, Stecker- und Sicherungsbelegungen. Wie im Abschnitt 5.7.3 beschrieben, können bei den generierten Prüfanweisungen automatisch zur Prüfung korrespondierende Zusatzinformationen angezeigt werden. Auch wenn diese Informationen (vor allem in Form von Abbildungen und kurzen Texten) nach wie vor manuell erstellt werden müssen, entfällt bei FiDis gegenüber der GFS der Aufwand des Einbauens der Informationen in alle relevanten Prüfanweisungen. Da beide Systeme die Anzeige von Zusatzinformationen ermöglichen, wird dieses Kriterium mit ☉ bewertet.

Für die Benutzerakzeptanz eines Diagnosesystems ist es ebenfalls wesentlich, dass der Anwender nachvollziehen kann, weshalb das System eine bestimmte Handlung vorschlägt. Gerade bei komplexen Systemen ist dies keine einfache Aufgabe. Die Nachvollziehbarkeit ist jedoch notwendig, damit das System nicht als eine Art „Zauberwürfel“ angesehen und in Konsequenz nicht verwendet wird. Bei der GFS ist es die Aufgabe des Autors, das Programm entsprechend mit Zusatzinformationen anzureichern. Bei Prüfungen von elektrischen Fehlern im Bordnetz sind vor allem geschickt ausgewählte Ausschnitte aus dem Stromlaufplan sinnvoll.

Im Abschnitt 5.7.3 wurde beschrieben, dass es mit FiDis möglich ist, für jede Prüfung Zusatzinformationen z. B. in der Stromlaufplanansicht auszugeben. Die Stromlaufplanansicht (vgl. Abbildung 5.8 auf S. 79) zeigt einen relevanten Ausschnitt aus dem fahrzeugindividuellen Stromlaufplan. Zu jeder Messung werden der geprüfte Pfad (z.B. bei einer Durchgangsprüfung die direkte Verbindung zwischen den beiden Messpunkten) sowie die potentiellen Fehlerkandidaten farbig hervorgehoben. Dadurch wird für den Anwender ersichtlich, weshalb das System eine bestimmte Messung vorgeschlagen hat. Auch kann er das Ergebnis der Messung dadurch selbst besser interpretieren. Wenn in einem Fahrzeug mehrere unabhängige Fehler vorliegen, wird bei jeder Prüfanweisung angegeben, auf welchen Fehler sie sich bezieht.

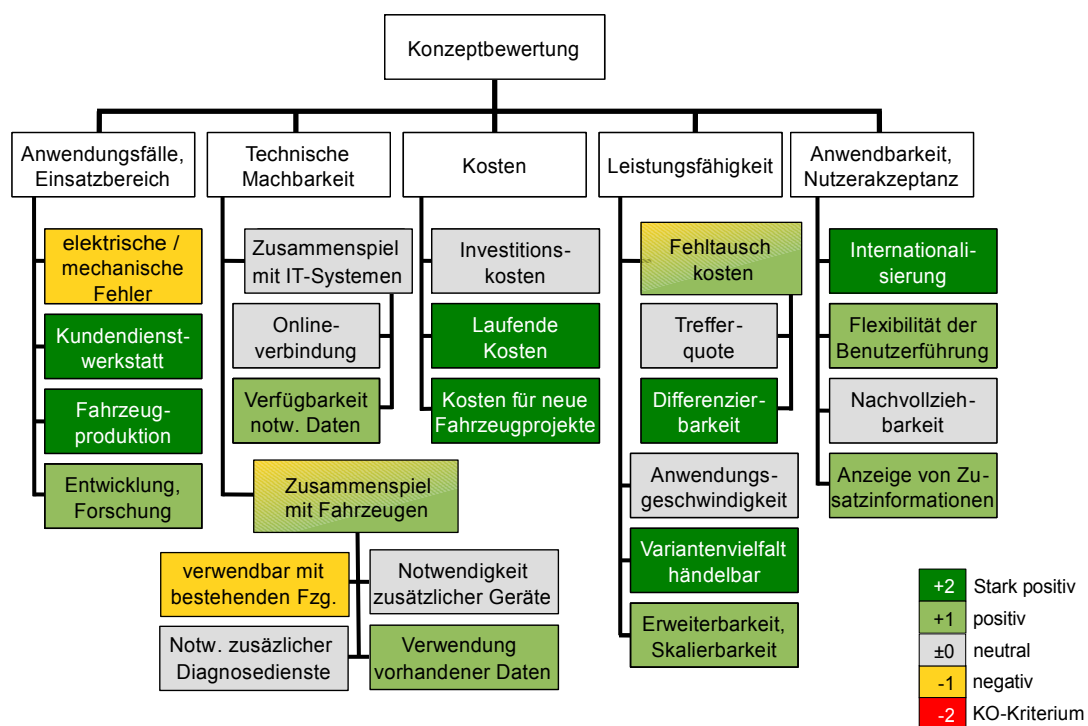


Abbildung 7.7.: Ergebnisse der Konzeptuntersuchung FiDis

Beide Systeme bieten die Möglichkeit, die Prüfanweisungen für den Anwender nachvollziehbar zu gestalten. Daher wird auch dieses Kriterium mit ☉ bewertet. Die Bewertung der Anwendbarkeit und Nutzerakzeptanz ist in Tabelle 7.7 dargestellt.

7.3.2 Vergleich Diagnose Internetportal mit GFS

Anwendungsfälle und Einsatzbereich

Ein Diagnose Internetportal kann genau wie die GFS prinzipiell für alle Arten von Fehlern eingesetzt werden. Für den Einsatz ist ein Internetzugang notwendig. Genau wie bei der GFS muss die Wissensbasis von Experten aufgebaut werden, was eine gewisse Zeit erfordert. Zur Erstellung der Wissensbasis ist es i. d. R. erforderlich, dass die Fahrzeuge fertig entwickelt sind und zur Verfügung stehen.

Bei der GFS werden die notwendigen Informationen bedarfsgerecht und situationsabhängig ausgegeben. Die Suche nach relevanten Informationen in einem Diagnose Internetportal sowie deren Filterung ist mit signifikantem Aufwand verbunden. Der Anwender eines Diagnose Internetportals muss z. B. jeweils selbst entscheiden, ob die gefundene Information zur Fahrzeugvariante und Fehlersituation passt.

Technische Machbarkeit

Für den Betrieb eines Diagnose Internetportals ist ein entsprechender Server sowie eine Internet- bzw. Intranetverbindung für alle Anwender notwendig. Die Wissensbasis für das Diagnose Internetportal muss von Grund auf neu aufgebaut werden. Eine Übernahme der bestehenden GFS-Wissensbasis in das Diagnose Internetportal ist nicht möglich. Prinzipiell kann das Diagnose Internetportal auch bei Altfahrzeugen ⁵ helfen. Dafür müsste genau wie für die GFS eine Wissensbasis angelegt und gepflegt werden.

Kosten

Für den Betrieb solcher Systeme fallen i. d. R. keine oder nur sehr geringe Kosten an. Die Kosten für den Betrieb eines Diagnose Internetportals werden maßgeblich durch den Aufwand für die Erstellung und Pflege der Wissensbasis bestimmt. Prinzipiell sind zwei Methoden zur Erstellung von Beiträgen vorstellbar:

1. Erstellung von Beiträgen durch Anwender (Mechaniker in der Werkstatt)
2. Erstellung von Beiträgen durch spezielle Autoren (vgl. mit GFS-Autoren)

Die Kosten müssten in beiden Fällen durch den Automobilkonzern getragen werden. Es ist vorstellbar, dass die meisten Beiträge durch spezielle Autoren verfasst werden. Der Aufwand für das Verfassen hilfreicher Beiträge für ein Diagnose Internetportal ist vergleichbar mit dem zum Erstellen eines Fehlersuchprogramms für die GFS.

Leistungsfähigkeit

Ein Diagnose Internetportal ist im Vergleich zu anderen Diagnosesystemen nicht sehr leistungsfähig. Die Wahrscheinlichkeit ist sehr hoch, dass es nicht nur einen Beitrag gibt, der genau den Fehlerfall beschreibt, sondern dass es viele Beiträge gibt, die jeweils ähnliche Fälle beschreiben. Es ist die Aufgabe des Mechanikers alle Beiträge zu sichten, bezüglich der Relevanz zu filtern und daraus notwendige Schlüsse zu ziehen. Die Trefferquote wird daher geringer ausfallen als bei der GFS. Auf Grund des Such- und Filteraufwandes ist die Anwendungsgeschwindigkeit im Vergleich zur GFS geringer. Eine hohe Variantenvielfalt ist mit einem Diagnose Internetportal nur mit hohem Aufwand realisierbar (vergleichbar mit GFS). Ein Beitrag wird sich i. d. R. immer nur auf eine konkrete Variante beziehen. Ähnlich wie bei der GFS müssen Beiträge möglichst allgemeingültig formuliert werden. Das wirkt sich negativ auf die Differenzierbarkeit aus.

⁵Fahrzeuge, die nicht mehr hergestellt werden

Kriterien	Beschreibung	Bewertung
Anwendungsfälle und Einsatzbereich		
elektrische oder mechanische Fehler	Es lassen sich sowohl elektrische als auch mechanische Fehler diagnostizieren	⊖
Kundendienstwerkstatt	erhöhter Aufwand für die Suche und Filterung der Informationen	⊖
Fahrzeugproduktion	Wissensbasis zu Produktionsbeginn nicht verfügbar erhöhter Aufwand für die Suche und Filterung der Informationen	⊖
Entwicklung, Forschung	Wissensbasis vermutlich nur für Serienfahrzeuge verfügbar	⊖
Technische Machbarkeit		
Zusammenspiel mit IT-Systemen	Eine Integration in bestehende IT-Systeme ist nicht notwendig	⊖
Zusammenspiel mit Fahrzeugen	nur für Fahrzeuge geeignet, für die eine Wissensbasis besteht	⊖
Kosten		
Investitionskosten	Im Vergleich zu den Kosten bei der Einführung der GFS wären die Kosten für die Einführung eines Diagnose Internetportals zu vernachlässigen	⊕
laufende Kosten	hoher Aufwand für manuelle Pflege der Wissensbasis vergleichbar mit GFS	⊖
Kosten für neue Fahrzeugprojekte	sehr hoher Aufwand, vergleichbar mit GFS	⊖
Leistungsfähigkeit		
Trefferquote	Die Trefferquote ist verglichen mit der GFS schlechter	⊖
Differenzierbarkeit	Auf Grund der notwendigen Allgemeingültigkeit der Formulierungen ist eine gute Differenzierbarkeit nur eingeschränkt möglich (genau so wie bei der GFS)	⊖
Anwendungsgeschwindigkeit	Erhöhter Aufwand für das Suchen und Filtern von Informationen verringert die Anwendungsgeschwindigkeit	⊖
Variantenvielfalt beherrschbar	Eine hohe Variantenvielfalt ist mit einem Diagnose Internetportal nur schlecht realisierbar (vergleichbar mit GFS)	⊖
Erweiterbarkeit, Skalierbarkeit	Die beiden Systeme sind in diesem Bezug vergleichbar	⊖
Anwendbarkeit und Nutzerakzeptanz		
Internationalisierung	Eine Internationalisierung (alle Beiträge in allen Sprachen) ist nur mit sehr hohem Aufwand möglich	⊖
Flexibilität der Benutzerführung	Die Benutzerführung kann sehr flexibel gestaltet werden	⊕
Anzeige von Zusatzinformationen	Die Anzeige von Zusatzinformationen ist mit beiden Systemen möglich.	⊖
Nachvollziehbarkeit	Eine Nachvollziehbarkeit erfordert einen hohen Aufwand bei der Erstellung der Beiträge	⊖

Tabelle 7.8.: Konzeptbewertung eines Diagnose Internetportals für die Fahrzeugdiagnose

Anwendbarkeit und Nutzerakzeptanz

Eine Internationalisierung eines Diagnose Internetportal ist nur möglich, indem alle Beiträge jeweils in alle Sprachen übersetzt werden. Der Aufwand dafür ist voraussichtlich höher als bei der Übersetzung der Fehlersuchprogramme. Da die Bedienung eines solchen Systems keinen vorgegebenen Abläufen unterliegt, ist es sehr flexibel. Eine Nachvollziehbarkeit ist nur durch entsprechende Formulierungen im Beitrag gegeben. Die Anzeige von Zusatzinformationen in einem Diagnose Internetportal ist möglich.

7.3.3 Vergleich Neucus mit GFS

Das Diagnosesystem Neucus ist in [Mül11] beschrieben. Dort wurde auch eine Konzeptbewertung durchgeführt, welche die gleichen Kriterien sowie das gleiche Bewertungsschema wie hier verwendet. Die Tabelle 7.9 zeigt die Bewertung des Diagnosesystems Neucus. Die Tabelle wurde vollständig aus [Mül11] übernommen.

Kriterien	Beschreibung	Bewertung
Anwendungsfälle und Einsatzbereich		
elektrische oder mechanische Fehler	Es lassen sich elektrische, mechatronische und mechanische Fehler diagnostizieren	⊖
Kundendienstwerkstatt	Stand-Alone mögl. Deutliche Vorteile in der Kombination mit der GFS durch kollektive Wissensakquisition usw.	⊕⊕
Fahrzeugproduktion	Einsatz zur Optimierung der Fehlersuche am Ende der Produktionslinie	⊕
Entwicklung, Forschung	Scheidet als Einsatzbereich aufgrund mangelnder Lerndaten prinzipbedingt aus	⊖⊖
Technische Machbarkeit		
Zusammenspiel mit IT-Systemen	Infrastruktur zur Datenerfassung, Verbreitung der Modelle und zur Datenanalyse vollständig vorhanden.	⊕⊕
Zusammenspiel mit Fahrzeugen	Für alle Fahrzeuge geeignet. Anpassungsfähig gegenüber zukünftigen Fahrzeugarchitekturen.	⊕
Kosten		
Investitionskosten	Keine signifikanten Investitionen notwendig	⊖
Laufende Kosten	Keine manuelle Pflege der Wissensbasis	⊕⊕
Kosten für neue Fahrzeugprojekte	Kein großer manueller Aufwand notwendig	⊕⊕
Leistungsfähigkeit		
Trefferquote	Beide Systeme können hohe Trefferquoten erzielen, für die GFS jedoch mit hohem Aufwand	⊕
Differenzierbarkeit	Beide Systeme können theoretisch eine hohe Differenzierbarkeit erreichen, in der Praxis ist diese bei beiden geringer	⊖
Fehlersuchzeit	Durch die Minimierung des mittleren quadratischen Fehlers hat Neucus Vorteile	⊕
Variantenvielfalt beherrschbar	Für die GFS sehr aufwändig. Neucus lernt ohne Mehraufwand Varianten zu unterscheiden.	⊕⊕
Erweiterbarkeit, Skalierbarkeit	Neucus ist plattformunabhängig und baut auf Open-Source-Software auf. Erweiterungen der GFS sehr aufwändig.	⊕⊕
Anwendbarkeit und Nutzerakzeptanz		
Internationalisierung	Übersetzungen für Rep.-Lösungen und Symptomkataloge vorhanden. GFS-Programme müssen übersetzt werden.	⊕
Flexibilität der Benutzerführung	Maximale Flexibilität durch gewichtete Liste an mögl. Ursachen. GFS sehr starr.	⊕⊕
Nachvollziehbarkeit	Nachvollziehbarkeit der GFS theoretisch gegeben, praktisch aber oft vernachlässigt. In Neucus mögl. durch zus. stat. Informationen.	⊖
Anzeige von Zusatzinformationen	Beide Systeme können vielfältige Informationen integrieren/verknüpfen.	⊖

Tabelle 7.9.: Konzeptbewertung für das Diagnosesystem Neucus Quelle: [Mül11]

7.3.4 Zusammenfassung der Konzeptbewertung

In diesem Abschnitt wurden die funktionalen Konzepte der Diagnosesysteme aus Abschnitt 7.2 diskutiert und bewertet. Die verwendeten Kriterien wurden zu Beginn des Abschnittes in Abbildung 7.6 dargestellt. In der Abbildung 7.7 sind die Bewertungskriterien gemäß der

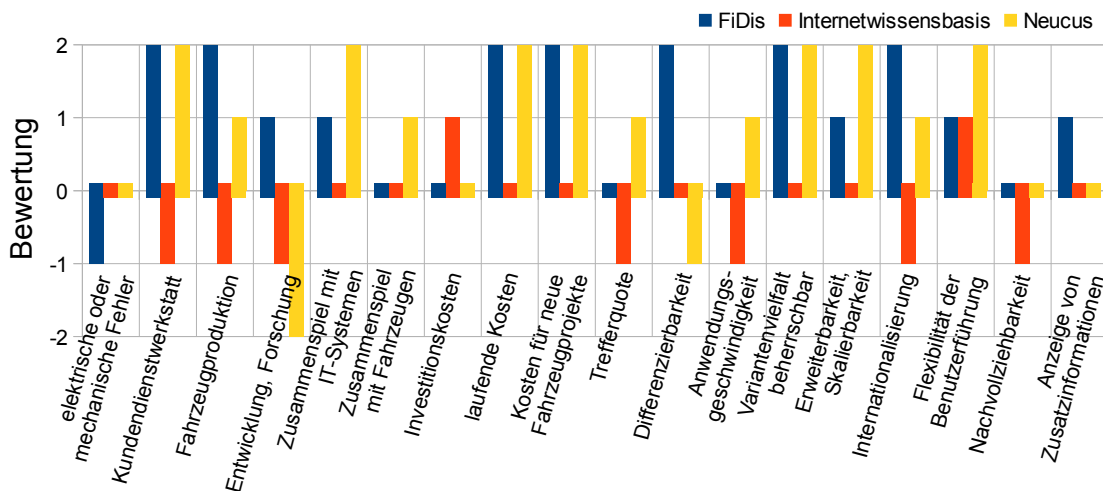


Abbildung 7.8.: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Konzeptuntersuchungen

Ergebnisse aus dem Vergleich FiDis mit GFS eingefärbt. Die Abbildung 7.8 stellt die Ergebnisse aller drei Vergleiche gegenüber. Es ist zu erkennen, dass die intelligenten Diagnosesysteme FiDis und Neucus deutliche Vorteile gegenüber rein wissensbasierten Systemen haben.

7.4 Werkstatterprobung

Die Werkstatterprobung ist die zweite Stufe des verwendeten dreistufigen Evaluierungsverfahrens. Nachdem in der ersten Stufe die zugrundeliegenden Konzepte bewertet und mit dem etablierten System verglichen wurden, werden in diesem Abschnitt die Umsetzungen der Konzepte bewertet und gegenübergestellt. Dafür kamen ein Kundendiensttester VAS5051/B mit GFS sowie die Diagnosesysteme FiDis und Neucus auf einem Laptop zum Einsatz. Eine Diagnose Internetportal konnte nicht untersucht werden, da zu diesem Zeitpunkt kein sinnvoll einsetzbares System mit einer adäquaten Wissensbasis zur Verfügung stand.

Bei der Erprobung von Diagnosesystemen ist es praktisch nicht möglich, eine vollständige Testabdeckung zu erreichen. Da die Prüfabläufe bei FiDis zur Laufzeit berechnet werden und von der konkreten Ausstattungsvariante und den Ausfallwahrscheinlichkeiten abhängen, ergibt sich ein unendlich großer Testraum. Die GFS besteht zwar aus einer endlichen Menge an Fehlersuchprogrammen (ca. 100.000 - Stand 2011), aber es ist dennoch kaum möglich diese (vor allem nicht unter Berücksichtigung aller Fahrzeugvarianten) abzuprüfen.

Um das Verhalten der Diagnosesysteme zu untersuchen, wurden einige typische elektrische Fehler in ein Fahrzeug eingebaut. Anschließend wurde versucht, die Fehler mit Hilfe der Diagnosesysteme zu finden. Um die Funktionalität des Diagnosesystems FiDis sowie die Qualität der generierten Prüfanweisungen bewerten zu können, reichen vergleichsweise wenige Testfälle aus, da die Algorithmen für die Ermittlung der Fehlerkandidaten sowie zur Generierung der Prüfanweisungen immer nach dem gleichen Prinzip funktionieren. Bei der GFS trifft dies nicht zu, da von der Funktionalität und Qualität der durchgeführten Fehlersuchprogramme nur eingeschränkt auf das Verhalten der übrigen Fehlersuchprogramme geschlossen werden kann. Insgesamt wurden 22 verschiedene Fehlerfälle untersucht. Aus den 22 Fällen wurden 6 typische Fehler ausgewählt und im Folgenden genauer beschrieben. Die Untersuchungen wurden mit einem VW Golf Modelljahr 2006 in einer Werkstatt der Volkswagen AG durchgeführt. Die 6 beschriebenen Fälle wurden so ausgewählt, dass sie die Bandbreite des beobachteten Verhaltens möglichst gut wiedergeben.

Typische Fehlerbilder sind z.B. Unterbrechungen einzelner Leitungen, Kurzschlüsse einzelner Leitungen gegen Masse oder Defekte in den Sensoren bzw. Aktoren, die sich aus Sicht des

FiDis	Fehlerkandidat	Fehlerwahrscheinlichkeit
1	Luftmassenmesser	0,487
2	Stecker am Luftmassenmesser	0,206
3	Leitung 1 Luftmassenmesser → Motorsteuergerät	0,107
4	Leitung 2 Luftmassenmesser → Motorsteuergerät	0,107
5	Motorsteuergerät	0,08
Neucus	Diagnose-Hypothese	Vertrauenswert
1	Luftmassenmesser (ETRN ^a 906 461)	77%
2	Zentral-Leitungssatz instandsetzen (AP ^b)	42%
3	Luftmassenmesser aus- u. eingebaut (AP)	35%

^aErsatzteilnummer

^babgerechnete Arbeitsposition

Tabelle 7.10.: Fehlerfall 1: Ergebnisse der FiDis-Fehlerkandidatenermittlung sowie der Neucus Diagnose-Hypothesen

Steuergerätes auch als Unterbrechung, Kurzschluss oder unplausibles Verhalten darstellen. Um diese Fehler zu simulieren, wurden Stecker von Sensoren und Aktoren abgezogen und teilweise Kurzschlüsse eingebaut. Die Fehlerreaktion im Steuergerät ist dabei die gleiche wie bei einem real aufgetretenen Fehler. Nachdem das Steuergerät den Fehler über einen gewissen Zeitraum (Fehlerqualifizierungszeit) beobachtet hat, wird ein DTC, der auf das betreffende Bauteil (Sensor oder Aktor) verweist, im Ereignisspeicher des Steuergerätes abgelegt.

7.4.1 Ausgewählte elektrische Fehler

Fehlerfall 1: (Stecker des Luftmassenmessers) Der Heißfilm-Luftmassenmesser (HFL) ist ein Sensor, den das Motorsteuergerät (MSG) für die optimale Regelung des Motors benötigt. Er ist im Saugrohr zwischen Luftfilter und Turbolader verbaut und elektrisch mit dem Motorsteuergerät verbunden. Im Test wurde der Stecker vom Sensor abgezogen. Dies entspricht einer elektrischen Unterbrechung und kann in der Praxis durch einen Defekt des Sensors, des Steckers oder der Leitung entstehen. Nach Motorstart legt das Motorsteuergerät den DTC 16486 („Luftmassenmesser-G70 Signal zu klein“) ab.

Die Tabelle 7.10 stellt die Ergebnisse der wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung aus FiDis sowie der Diagnose-Hypothese aus Neucus dar. Die Elemente der FiDis-Fehlerkandidatenliste sind nach Fehlerwahrscheinlichkeiten gewichtet. Der Luftmassenmesser hat eine deutlich höhere Fehlerwahrscheinlichkeit als der dazugehörige Stecker. Das liegt vor allem an der höheren A-Priori-Ausfallwahrscheinlichkeit des Luftmassenmessers. Die Diagnose-Hypothese von Neucus sieht sehr ähnlich aus. Der prozentuale Vertrauenswert in den Luftmassenmesser als fehlerverursachendes Bauteil ist am größten. Die Arbeitsposition „Zentral-Leitungssatz instandsetzen“ an zweiter Stelle schließt einen defekten Stecker als Fehlerursache mit ein.

Im Anschluss an die Ausgabe der Fehlerkandidaten, wurden mit FiDis automatisch Prüfschritte generiert und ausgegeben. In der Tabelle 7.11 sind die ausgegebenen Prüfanweisungen von FiDis und der GFS dargestellt (Texte teilweise gekürzt). In der rechten Spalte der Tabelle ist die ungefähre Zeit angegeben, welche die Durchführung der Prüfung in Anspruch genommen hat.

Die Überprüfung des Luftmassenmessers ist wesentlich aufwändiger als die Überprüfung des Steckers. Deshalb wird der HFL trotz seiner hohen Fehlerwahrscheinlichkeit von FiDis erst an vierter Stelle zur Prüfung vorgeschlagen. Die Durchgangsprüfungen zum MSG-Stecker setzen einen Ausbau des Motorsteuergerätes voraus, was ebenfalls mit hohem Aufwand verbunden ist. Der eingebaute Fehler (Stecker des HFL) wäre mit FiDis bereits nach dem ersten Prüfschritt gefunden wurden.

FiDis	Prüfanweisungen	Aufwand
1	Überprüfung des Steckers am Luftmassenmesser	ca. 5 min
2	Spannungsmessung am HFL-Stecker Pin 2 (Soll: 12 V)	ca. 5 min
3	Masseprüfung am HFL Pin 1	ca. 1 min
4	Überprüfung Bauteil Luftmassenmesser	ca. 10 min
5	Durchgangsprüfung von HFL-Stecker Pin 4 nach MSG-Stecker Pin 40	ca. 10 min
6	Durchgangsprüfung von HFL-Stecker Pin 3 nach MSG-Stecker Pin 60	ca. 1 min
GFS	Prüfanweisungen	Aufwand
1	Überprüfung des Luftfiltereinsatzes auf Durchnässung, Beschädigung und korrekten Sitz	ca. 5 min
2	Überprüfung aller Massepunkte im Motorraum gemäß Stromlaufplan	ca. 15 min
3	Strommessung am Pin 2 des HFL (Soll: 28 mA)	ca. 5 min
4	Spannungsmessung an einer Signalleitung (Soll: 1,14 V bis 1,185 V)	ca. 1 min
5	manuelle Plausibilisierung mehrerer Messwertblöcke aus dem MSG	ca. 8 min

Tabelle 7.11.: Fehlerfall 1: Ausgegebene Prüfanweisungen von FiDis und der GFS

Neucus gibt im Gegensatz zu FiDis keine konkreten Prüfanweisungen aus. Die Arbeitsposition an zweiter Stelle „Zentral-Leitungssatz instandsetzen“ würde jedoch den Fehler beseitigen. Wie viel Zeit diese Arbeit in Anspruch nimmt, hängt vom Vorgehen des Mechanikers ab. Es muss davon ausgegangen werden, dass beim Einsatz von Neucus zuerst der Luftmassenmesser überprüft wird (Aufwand ca. 10min) und erst danach der Leitungssatz überprüft wird. Die Ausgabe von FiDis „Überprüfung des Steckers am Luftmassenmesser“ an erster Stelle führt schneller zum Ziel.

Mit der GFS wäre der Fehler vermutlich erst nach dem dritten Prüfschritt aufgefallen. Da allein der zweite Prüfschritt (Überprüfung aller Massepunkte im Motorraum) erheblichen Aufwand verursacht hätte, ist der von der GFS vorgeschlagene Prüfablauf am ungünstigsten. Den besten Prüfablauf für diesen Fehlerfall hat FiDis geliefert.

Fehlerfall 2: (Stecker des Kraftstofftemperaturgebers) Das Motorsteuergerät berücksichtigt die Temperatur des Kraftstoffs bei der Berechnung der Einspritzdauer. Der dafür notwendige Temperatursensor befindet sich an der Kraftstoffleitung und ist elektrisch mit dem MSG verbunden. Für den Test wurde ebenfalls eine elektrische Unterbrechung simuliert, indem der Stecker am Sensor abgezogen wurde. Das Motorsteuergerät hat als Reaktion auf den Fehler den DTC 16567 („Geber für Kraftstofftemp.-G81 Unterbrechung/Kurzschluss nach Plus“) abgelegt. In der Tabelle 7.12 sind die von FiDis ermittelten Fehlerkandidaten einschließlich der Fehlerwahrscheinlichkeiten sowie die Diagnose-Hypothese des Diagnosesystems Neucus dargestellt

Es ist zu erkennen, dass beide Systeme ähnliche Ergebnisse liefern. Der defekte Stecker wird bei FiDis an zweiter Stelle ausgegeben. Bei Neucus würde vermutlich die Position drei *Zentral-Leitungssatz instandsetzen* den Fehler beseitigen.

In der Tabelle 7.13 sind die vorgeschlagenen Prüfungen von FiDis sowie der GFS dargestellt. Es ist zu erkennen, dass FiDis eine ähnliche Fehlersuchstrategie wie im Fehlerfall 1 anwendet. Der eingebaute Fehler wird wiederum mit dem ersten Prüfschritt gefunden. Mit Hilfe einer Prüfung nach Stromlaufplan im zweiten Schritt der GFS hätte der Mechaniker den Fehler wahrscheinlich auch gefunden. Der Aufwand in der Werkstatt ist allerdings höher, da der Stromlaufplan nicht im Diagnosesystem hinterlegt ist, sondern i. d. R. erst am PC gesucht und ausgedruckt werden muss. Die Effizienz sowie die Erfolgsquote einer manuellen Überprüfung nach Stromlaufplan hängt darüber hinaus maßgeblich von den Fähigkeiten des Mechanikers ab.

Fehlerfall 3: (Stecker am Nockenwellensensor) Im Fehlerfall 3 wurde der Stecker vom Nockenwellensensor des Motors abgezogen. Als Reaktion darauf wurde der DTC 19463 („Nockenwellenpositionssensor - G40 kein Signal“) im MSG abgelegt. Die durch FiDis und Neucus ermittelten Fehlerkandidaten sind in Tabelle 7.14 angegeben. Die Prüfungen aus FiDis und der GFS sind in Tabelle 7.15 dargestellt.

<i>FiDis</i>	<i>Fehlerkandidat</i>	<i>Fehlerwahrscheinlichkeit</i>
1	Kraftstofftemperaturgeber	0,781
2	Stecker am Kraftstofftemperaturgeber	0,222
3	Leitung 1 Kraftstofftemperaturgeber → MSG	0,03
4	Leitung 2 Kraftstofftemperaturgeber → MSG	0,03
5	Motorsteuergerät	0,01
<i>Neucus</i>	<i>Diagnose-Hypothese</i>	<i>Vertrauenswert</i>
1	Kraftstofftemperaturgeber (ETRN 906 081)	95%
2	Temperaturgeber aus- u. eingebaut (AP)	24%
3	Zentral-Leitungssatz instandsetzen (AP)	17%

Tabelle 7.12.: Fehlerfall 2: Ergebnisse der FiDis-Fehlerkandidatenermittlung sowie der Neucus Diagnose-Hypothesen

<i>FiDis</i>	<i>Prüfanweisungen</i>	<i>Aufwand</i>
1	Überprüfung des Steckers am Kraftstofftemperaturgeber	ca. 5 min
2	Überprüfung des Kraftstofftemperaturgeber	ca. 5 min
3	Durchgangsprüfung von Sensor-Stecker Pin 1 nach MSG-Stecker Pin 40	ca. 10 min
4	Durchgangsprüfung von Sensor-Stecker Pin 2 nach MSG-Stecker Pin 39	ca. 1 min
<i>GFS</i>	<i>Prüfanweisungen</i>	<i>Aufwand</i>
1	Ausgabe des Messwerts Kraftstofftemperatur aus dem Motorsteuergerät (255 °C)	ca. 1 min
2	manuelle Überprüfung nach Stromlaufplan	ca. 20 min

Tabelle 7.13.: Fehlerfall 2: Ausgegebene Prüfanweisungen von FiDis und der GFS

<i>FiDis</i>	<i>Fehlerkandidat</i>	<i>Fehlerwahrscheinlichkeit</i>
1	Nockenwellensensor	0,769
2	Stecker am Nockenwellensensor	0,219
3	Leitung 1 Nockenwellensensor → Motorsteuergerät	0,03
4	Leitung 2 Nockenwellensensor → Motorsteuergerät	0,03
5	Leitung 3 Nockenwellensensor → Motorsteuergerät	0,03
6	Motorsteuergerät	0,022
<i>Neucus</i>	<i>Diagnose-Hypothese</i>	<i>Vertrauenswert</i>
1	Nockenwellensensor (ETRN 957 147)	64%
2	Nockenwellensensor aus- u. eingebaut (AP)	37%
3	Kabelreparatursatz (ETRN 979 133)	10%

Tabelle 7.14.: Fehlerfall 3: Ergebnisse der FiDis-Fehlerkandidatenermittlung sowie der Neucus Diagnose-Hypothesen

Sowohl mit FiDis als auch mit der GFS hätte der Fehler bereits mit dem ersten oder spätestens mit dem zweiten Prüfschritt gefunden werden können. Die GFS schlägt die Messung mit einem digitalen Speicheroszilloskop (DSO) vor. Sowohl die Messung als auch die Interpretation der Messergebnisse stellt für viele Mechaniker eine schwierige Aufgabe dar. Mit Hilfe dieser Messung können jedoch mehrere mögliche Fehlerursachen wie z. B. ein Defekt des Sensors, ein mechanischer Fehler im Motor oder eine Störung der Spannungsversorgung mit einem Schritt überprüft werden. Die Autoren der GFS unterstützen den Mechaniker dabei, durch präzise Angaben bezüglich der Konfiguration und des Anschlusses des DSO sowie durch Ausgabe einer Sollkurve. Die Sollkurve stellt den idealen Signalverlauf eines intakten Sensors dar. Der Mechaniker braucht dadurch nur den gemessenen Signalverlauf mit der Sollkurve zu vergleichen. Für die Erstellung einer solchen Prüfung ist ein hohes Maß an Expertenwissen notwendig. Die GFS-Prüfung kann beim Einsatz von FiDis, wie im Abschnitt 5.6.3 beschrieben, weiterhin für

<i>FiDis</i>	<i>Prüfanweisungen</i>	<i>Aufwand</i>
1	Überprüfung des Steckers am Nockenwellensensor	ca. 5 min
2	Überprüfung des Nockenwellensensor	ca. 5 min
3	Durchgangsprüfung von Sensor-Stecker Pin 1 nach MSG-Stecker Pin 27	ca. 10 min
4	Durchgangsprüfung von Sensor-Stecker Pin 2 nach MSG-Stecker Pin 28	ca. 1 min
5	Durchgangsprüfung von Sensor-Stecker Pin 3 nach MSG-Stecker Pin 12	ca. 1 min
<i>GFS</i>	<i>Prüfanweisungen</i>	<i>Aufwand</i>
1	Signalmessung mit digitalem Speicheroszilloskop an Pin 2	ca. 10 min
2	Überprüfung der Versorgungsspannung des Sensors	ca. 5 min
3	Durchgangsprüfungen aller Leitungen zw. Sensor und MSG	ca. 15 min

Tabelle 7.15.: Fehlerfall 3: Ausgegebene Prüfanweisungen von FiDis und der GFS

Bauteilprüfungen verwendet werden. Im vorliegenden Fall könnte sie z.B. im Prüfschritt 2 zur Überprüfung des Sensors herangezogen werden.

Fehlerfall 4: (Stecker Kraftstoffpumpe / Vorratsanzeige) Der Sensor für die Kraftstoffvorratsanzeige ist in einem gemeinsamen Bauteil mit der Kraftstoffpumpe im Tank verbaut. In diesem Fehlerfall wurde die Verbindung zum Sensor aufgetrennt. Als Reaktion hat das Kombiinstrument den DTC 0771 (Geber für Kraftstoffvorratsanzeige kein Signal") abgelegt. Die Tabelle 7.16 zeigt die von FiDis ermittelten Fehlerkandidaten sowie die Diagnose-Hypothese von Neucus. Tabelle 7.17 enthält die ausgegebenen Prüfanweisungen. Auf Grund der hohen Fehlerwahrscheinlichkeit der Kraftstoffpumpe und des verhältnismäßig geringen Aufwands, der für die Überprüfung des Sensors für die Kraftstoffvorratsanzeige notwendig ist, empfiehlt FiDis in diesem Beispiel die Überprüfung des Sensors vor der Überprüfung des Steckers. Die Prüfanweisungen der GFS sind in diesem Fall weniger hilfreich. Die von Neucus ermittelten Ersatzteile und Arbeitspositionen wären nur zielführend, wenn der Fehler im Bauteil Kraftstoffpumpe/Kraftstoffgeber liegt. Defekte Bordnetzkomponenten werden dadurch nicht gefunden.

<i>FiDis</i>	<i>Fehlerkandidat</i>	<i>Fehlerwahrscheinlichkeit</i>
1	Kraftstoffpumpe	0,609
2	Kombiinstrument	0,254
3	Stecker Kraftstoffpumpe	0,152
4	Leitung 1 Kraftstoffpumpe → Kombiinstrument	0,04
5	Leitung 2 Kraftstoffpumpe → Kombiinstrument	0,04
<i>Neucus</i>	<i>Diagnose-Hypothese</i>	<i>Vertrauenswert</i>
1	Kraftstoffgeber aus- u. eingebaut (AP)	91%
2	Kraftstoffgeber (ET 919 673)	67%
3	Dichtring für Kraftstoffgeber (ET 919 133)	61%

Tabelle 7.16.: Fehlerfall 4: Ergebnisse der FiDis-Fehlerkandidatenermittlung sowie der Neucus Diagnose-Hypothesen

Fehlerfall 5: (Lichtdrehschalter) Beim fünften untersuchten Fehlerfall wurde der Lichtdrehschalter, der u. a. für das Ein- und Ausschalten des Fahr- und Standlichtes benötigt wird, abgezogen. Die Beleuchtung wird beim VW Golf V über das Bordnetzsteuergerät (BSG) geschaltet. Der Lichtdrehschalter ist damit aus elektrischer Sicht ein Sensor am BSG, der eine Spannungsversorgung benötigt und über mehrere Signalleitungen mit dem BSG verbunden ist. Das BSG hat als Reaktion auf den abgezogenen Lichtdrehschalter den DTC 1800 („Lichtschalter-E1, kein Signal / Kommunikation“) abgelegt.

Die Tabelle 7.18 enthält die von FiDis ermittelte Fehlerkandidatenliste sowie die Diagnose-Hypothesen von Neucus. In Tabelle 7.19 sind die vorgeschlagenen Prüfungen von FiDis sowie der GFS dargestellt. Die Ersatzteile und Arbeitspositionen von Neucus sind plausibel. Bereits

<i>FiDis</i>	<i>Prüfanweisungen</i>	<i>Aufwand</i>
1	Überprüfung Bauteil Kraftstoffpumpe / Füllstandssensor	ca. 5 min
2	Überprüfung Stecker an Kraftstoffpumpe / Füllstandssensor	ca. 5 min
3	Durchgangsprüfung Leitung 1 vom Kraftstoffpumpenstecker zum Kombiinstrumentstecker	ca. 10 min
4	Durchgangsprüfung Leitung 2 vom Kraftstoffpumpenstecker zum Kombiinstrumentstecker	ca. 1 min
<i>GFS</i>	<i>Prüfanweisungen</i>	<i>Aufwand</i>
1	Ausgabe relevanter Messwerte aus dem Kombiinstrument	ca. 1 min
2	Suche nach Stromlaufplan	ca. 20 min

Tabelle 7.17.: Fehlerfall 4: Ausgegebene Prüfanweisungen von FiDis und der GFS


<i>FiDis</i>	<i>Fehlerkandidat</i>	<i>Fehlerwahrscheinlichkeit</i>
1	Lichtdrehschalter	 0,53
2	Stecker am Lichtdrehschalter	 0,15
3	Leitung 1 Lichtdrehschalter → BSG	 0,06
4	Leitung 2 Lichtdrehschalter → BSG	 0,06
<i>Neucus</i>	<i>Diagnose-Hypothese</i>	<i>Vertrauenswert</i>
1	Lichtdrehschalter (ETRN 941 431)	 26%
2	Hauptlichtschalter aus- u. eingebaut (AP)	 4%

Tabelle 7.18.: Fehlerfall 5: Ergebnisse der FiDis-Fehlerkandidatenermittlung sowie der Neucus Diagnose-Hypothesen

<i>FiDis</i>	<i>Prüfanweisungen</i>	<i>Aufwand</i>
1	Überprüfung des Steckers am Lichtdrehschalter	ca. 5 min
2	Überprüfung des Bauteils Lichtdrehschalter	ca. 5 min
3	Überprüfung der Versorgungsspannung (+12V) am Stecker des Lichtdrehschalters	ca. 5 min
4	Überprüfung der Masseverbindung am Stecker des Lichtdrehschalters	ca. 1 min
5	Durchgangsprüfung Leitung 1 vom Lichtdrehschalter zum BSG	ca. 10 min
<i>GFS</i>	<i>Prüfanweisungen</i>	<i>Aufwand</i>
1	Auslesen und Anzeigen des Messwerteblocks „Schalterstellung Lichtdrehschalter“	ca. 1 min
2	Überprüfung der Sicherung SC13	ca. 1 min
3	Leitungsprüfung nach Stromlaufplan	ca. 20 min

Tabelle 7.19.: Fehlerfall 5: Ausgegebene Prüfanweisungen von FiDis und der GFS

mit der ersten von FiDis generierte Prüfung würde der nicht gesteckte Steckverbinder am Lichtdrehschalter gefunden werden. Die Leitungsprüfung nach Stromlaufplan, welche die GFS an zweiter Stelle vorschlägt, würde den Fehler ebenfalls finden. Jedoch werden durch das Beschaffen und Interpretieren des Stromlaufplans unnötige Arbeitsschritte vom Mechaniker verlangt.

Fehlerfall 6: (Rücklicht) Für den letzten beschriebenen Fehlerfall wurde der Stecker vom linken Rücklicht abgezogen. Das Bordnetzsteuergerät, an dem das Rücklicht angeschlossen ist, misst den Strom bei der Ansteuerung der Lampe. Liegt der Strom außerhalb des erwarteten Bereiches, wird der DTC 00984 (Lampe für Schlusslicht links-M4 elektrischer Fehler im Stromkreis) abgelegt und der Fahrer durch einen Hinweis im Kombiinstrument auf den Defekt des Rücklichts hingewiesen. Die Tabelle 7.20 zeigt die FiDis-Fehlerkandidaten sowie die Diagnose-Hypothesen von Neucus. Woher die von Neucus vorgeschlagene Arbeitsposition *Kombiinstrument aus- u. eingebaut* kommt, ist an dieser Stelle nicht nachvollziehbar. Die Tabelle 7.21 zeigt die von FiDis und der GFS ausgegebenen Prüfanweisungen.

<i>FiDis</i>	<i>Fehlerkandidat</i>	<i>Fehlerwahrscheinlichkeit</i>
1	Lampe Schlusslicht links	0,711
2	Stecker C am Bordnetzsteuergerät	0,125
3	Stecker am Schlusslicht links	0,122
4	Massepunkt nahe der Anhängerkupplung	0,091
5	Leitung BSG → Schlusslicht links	0,024
6	Leitung Massepunkt → Schlusslicht links	0,024
<i>Neucus</i>	<i>Diagnose-Hypothese</i>	<i>Vertrauenswert</i>
1	Schlussleuchte defekt (M-DISS)	45%
2	Kombiinstrument aus- u. eingebaut (AP)	37%
3	Schlussleuchte aus- u. eingebaut (AP)	27%

Tabelle 7.20.: Fehlerfall 6: Ergebnisse der FiDis-Fehlerkandidatenermittlung sowie der Neucus Diagnose-Hypothesen

<i>FiDis</i>	<i>Prüfanweisungen</i>	<i>Aufwand</i>
1	Überprüfung der Lampe im Schlusslicht	ca. 5 min
2	Masseprüfung am Stecker des Schlusslichtes	ca. 5 min
3	Spannungsmessung Am Stecker bei eingeschaltetem Licht (Soll: 12V)	ca. 1 min
4	Durchgangsprüfung vom Stecker Schlusslicht zum BSG	ca. 10 min
<i>GFS</i>	<i>Prüfanweisungen</i>	<i>Aufwand</i>
1	Sichtprüfung Lampe Rücklicht links	ca. 5 min
2	Sichtprüfung Stecker Rücklicht links und Stecker am BSG	ca. 5 min
3	Durchgangsprüfung mit Angabe der Pins zw. Stecker BSG und Stecker Rücklicht	ca. 10 min
4	Prüfung der Leitung zw. BSG und Rücklicht auf Kurzschluss nach Masse	ca. 5 min
5	Sichtprüfung des Massepunktes im Kofferraum	ca. 5 min

Tabelle 7.21.: Fehlerfall 6: Ausgegebene Prüfanweisungen von FiDis und der GFS

Bei der Durchführung der Spannungsprüfung (Prüfschritt 3) zeigte sich eine derzeitige Schwäche des Systems FiDis. Bei eingeschaltetem Licht konnte an dem angegebenen Kontakt des Steckers lediglich eine Spannung von 600mV gemessen werden. FiDis schloss dadurch auf eine Unterbrechung der Leitung oder einen Defekt des BSG. Beides war jedoch nicht der Fall. Das BSG schaltet, nachdem es einen Defekt der Lampe erkannt hat, den betreffenden Ausgang ab. Lediglich eine geringe Prüfspannung kann dann gemessen werden.

Die Signalbeschreibungen, welche für die Generierung der Spannungsprüfungen herangezogen werden, basieren auf Expertenwissen und weisen in diesem Fall einen Fehler auf. Die Prüfung hätte funktioniert, wenn die Vorbedingung nicht „Messung bei eingeschaltetem Abblendlicht“ sondern „Messung bei aktivem Stellgliedtest“ gewesen wäre. Bei einem Stellgliedtest (vgl. Abschnitt 2.1.1) wird der Ausgang meist unabhängig von der im Steuergerät implementierten Funktion angesteuert. Bei aktivem Stellgliedtest können am Stecker des Schlusslichtes 12V gemessen werden.

Solche Details müssen zukünftig bei der Erstellung der Signaldefinitionen für Spannungs- und Signalprüfungen berücksichtigt werden. Die GFS umgeht in diesem Fall das Problem, indem sie die wesentlich aufwändigere Durchgangsprüfung zwischen Rückleuchte und BSG⁶ vorschlägt. FiDis schlägt diese Prüfung erst vor, nachdem die Spannungsmessung fehlgeschlagen ist, und der Fehler demnach zwischen dem BSG und dem Stecker der Rückleuchte liegen muss.

Der nachgestellte Fehler (Stecker am Schlusslicht nicht gesteckt) wäre mit sowohl mit FiDis als auch mit der GFS im zweiten Prüfschritt gefunden wurden.

⁶Der Zugang zum Stecker am BSG ist wesentlich aufwendiger als der Zugang zum Stecker der Rückleuchte

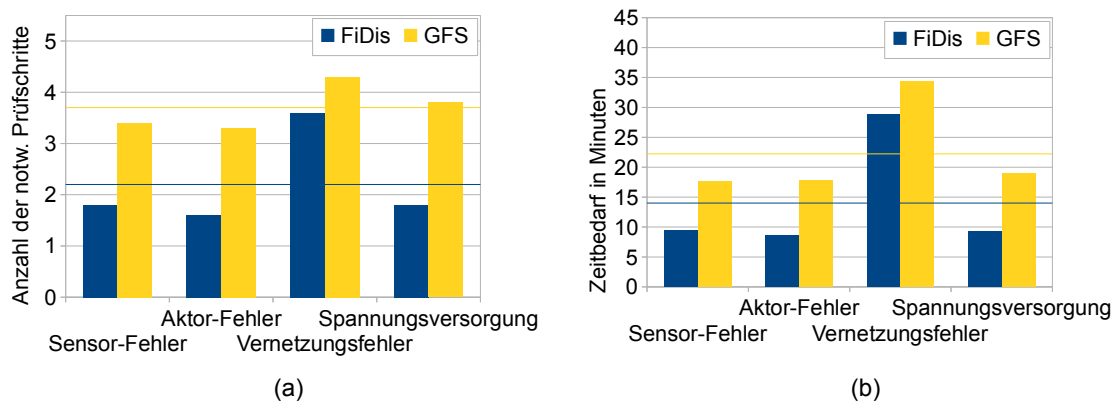


Abbildung 7.9.: (a) Vergleich der Anzahl der notwendigen Prüfschritte zw. FiDis und GFS
(b) Vergleich des Zeitbedarfs bis zur Identifikation der Fehlerursache

7.4.2 Zusammenfassung der Werkstatteprobung

In diesem Abschnitt wurde eine durchgeführte Werkstatteprobung dokumentiert. Dabei wurden Fehler in ein Fahrzeug eingebaut und anschließend versucht, die Fehler sowohl mit der GFS als auch mit FiDis und Neucus zu finden. Von den untersuchten Fällen wurden 6 näher beschrieben. Dabei hat sich gezeigt, dass FiDis in vielen Fällen bessere Ergebnisse liefert als die GFS. Ein Maß für die Effizienz einer Fehlersuche ist die Zahl der Prüfschritte bis zur Identifizierung der Fehlerursache. Die Abbildung 7.9.a stellt für die 22 Fälle die Anzahl der notwendigen Prüfschritte von GFS und FiDis gegenüber. Bei der Auswertung wurde eine Unterscheidung nach der Art der jeweiligen Fehler gemacht. Die Abbildung 7.9.b stellt den damit verbundenen Zeitbedarf in Minuten dar. Es ist eine signifikante Zeitersparnis bei der Fehlersuche zu erkennen, wenn FiDis anstelle der GFS verwendet wird.

7.5 Erprobung mit Felddaten

Die Erprobung des Diagnosesystems FiDis mit Felddaten stellt die dritte Stufe der Evaluierung dar. Dabei soll untersucht werden, ob das System die bisher gezeigte Leistungsfähigkeit auch in realen Fehlersituationen zeigt. Um dies zu untersuchen, wurde eine Auswahl abgeschlossener und dokumentierter Reparaturfälle mit FiDis nachgestellt. Bei den dokumentierten Reparaturfällen kam zur Fehlersuche die in den Werkstätten übliche GFS zum Einsatz.

Die GFS bietet die Möglichkeit, Diagnoseprotokolle zu erstellen und an ein Datawarehouse innerhalb der Volkswagen AG zu übermitteln. Bei Reparaturen, welche über Gewährleistung abgerechnet werden sollen, ist dies vorgeschrieben. Zusammen mit dem Gewährleistungsantrag und der Abrechnung können dadurch im Nachhinein die Problembeschreibung einschließlich aller DTCs, die Fehlerursache (reparierte oder ersetzte Teile), alle Prüfschritte, welche die GFS dem Mechaniker ausgegeben hat, sowie alle Eingaben, die der Mechaniker gemacht hat (z. B. Messergebnisse) nachvollzogen werden. Darüber hinaus sind alle abgerechneten Arbeitspositionen (z. B. Aus- und Einbauen eines Steuergerätes oder Überprüfen eines bestimmten Leitungsstrangs) sowie alle abgerechneten Ersatzteile bekannt. Auf Grund der Reparaturhandlungen und Ersatzteile lässt sich auf die fehlerverursachende Komponente schließen.

Für die nachfolgenden Untersuchungen wurden nur Fälle herangezogen, bei denen das gleiche Fahrzeug nicht innerhalb von vier Wochen mit einem vergleichbaren Problem erneut in einer Werkstatt war. Durch diese Einschränkung kann davon ausgegangen werden, dass in allen Fällen die Fehlerursache richtig erkannt und abgestellt wurde. Es wäre sicherlich interessant auch Fehlerfälle zu untersuchen, bei denen die Fehlersuche und Reparatur mit Hilfe der GFS nicht erfolgreich war. Leider kann jedoch in diesen Fällen anhand der vorliegenden Daten nicht auf

die Fehlerursache sowie auf die Schritte, die zu deren Identifikation geführt hätten, geschlossen werden.

Die Falldaten lagen in einer Datenbank vor. Über die bereits beschriebene Automatisierungsschnittstelle kann FiDis dadurch nachträglich mit den gleichen Fehlerbildern beaufschlagt werden. Die ermittelten Fehlerkandidaten sowie die notwendigen Prüfschritte werden wiederum in einer Datenbank protokolliert. Dadurch war es möglich, reale Fehler aus dem Feld nachträglich durch FiDis bewerten zu lassen. Die Ergebnisse konnten jeweils mit den Ergebnissen der Werkstätten verglichen werden.

Für die Untersuchung standen Daten von insgesamt 219 erfolgreichen Reparaturen aus unterschiedlichen Werkstätten zur Verfügung. In allen Fällen handelte es sich um Fahrzeuge vom Typ VW Golf Modelljahr 2006. In den Fahrzeugen gab es elektrische Fehler, die durch einen oder mehrere DTCs angezeigt wurden. Zu jedem Fahrzeug existiert ein passender Datensatz mit strukturbeschreibenden Daten, so dass FiDis im Nachhinein für diese Fehlerfälle Fehlerkandidaten ermitteln und Prüfungen generieren kann. Die 219 untersuchten Fälle sind willkürlich ausgewählt. Die Bandbreite der Fehlerfälle reicht von sehr einfachen Fehlern wie z.B. ein von der On-Bord-Diagnose erkanntes defektes Steuergerät bis hin zu komplexen Fehlern im Bordnetz mit DTCs in einer Vielzahl von Steuergeräten.

In der Tabelle 7.22 sind die Kategorien dargestellt, zu denen die fehlerverursachenden Bauteile der untersuchten Fehlerfälle gehören. Es ist zu erkennen, dass der größte Teil der elektrischen Fehler Kupferfehler (vgl. Abschnitt 5.3), d. h. Fehler im Bordnetz sind. Da die On-Board-Diagnose bei dieser Art von Fehlern prinzipbedingt nur eine sehr geringe Diagnosetiefe aufweist, lässt sich in diesen Fällen die Leistungsfähigkeit der Off-Board-Diagnosesysteme besonders gut vergleichen.

In diesem Abschnitt wird mit statistischen Mitteln untersucht, wie die Diagnosesysteme FiDis und GFS mit den teilweise sehr unterschiedlichen Fehlersituationen umgehen. Wie im Abschnitt 7.4 werden auch hier im ersten Schritt die Fehlerkandidatenermittlung und im zweiten Schritt das Gesamtsystem einschließlich des Inhalts sowie der Reihenfolge der Prüfungen untersucht. Da die GFS keine explizite Fehlerkandidatenermittlung enthält, können im Bezug auf die Fehlerkandidatenermittlung die Ergebnisse von FiDis nicht mit denen der GFS verglichen werden. Dies ist erst im zweiten Schritt möglich.

Zu untersuchende Eigenschaften:

1. Aussagekraft der initialen Fehlerkandidatenliste (nur FiDis)
 - In wie vielen Fällen ist das fehlerverursachende Bauteil bereits in der initialen Fehlerkandidatenliste enthalten?
 - An welcher Position erscheint das fehlerverursachende Bauteil in der Liste?
 - Wie hoch ist die berechnete Fehlerwahrscheinlichkeit des fehlerverursachenden Bauteils in der initialen Fehlerkandidatenliste?
2. Inhalt und Reihenfolge der Prüfungen (FiDis und GFS)
 - Wie viele Prüfschritte sind notwendig um das fehlerverursachende Bauteil zu identifizieren?
 - Wie hoch ist der Aufwand zur Durchführung der Prüfschritte?

<i>Fehlerursache nach Kategorien</i>		<i>Häufigkeit in %</i>
1	Kupferfehler (Leitungen, Stecker, Splices, Massepunkte,...)	48,9 %
2	Peripherie (Sensoren, Aktoren, Relais, Sicherungen)	29,9 %
3	Steuergeräte	21,2 %

Tabelle 7.22.: Kategorisierung der Fehlerursachen

- In wie vielen Fällen kann das fehlerverursachende Bauteil nicht durch die vorgeschlagenen Prüfungen gefunden werden?

7.5.1 Aussagekraft der initialen Fehlerkandidatenliste

Im ersten Schritt werden die von FiDis ermittelten initialen Fehlerkandidatenlisten untersucht. Die Listen werden von der wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung (vgl. Kapitel 4) berechnet, bevor das System eine Prüfanweisung ausgibt. Die Berechnungen erfolgen ausschließlich auf Basis der Fehlersymptome (DTCs) sowie Strukturdaten und sind die Basis für die ersten ausgegebenen Prüfanweisungen. In späteren Iterationszyklen werden die Ergebnisse der durchgeführten Prüfschritte bei der Berechnung der Fehlerkandidatenliste berücksichtigt. Die Listen sind nach Fehlerwahrscheinlichkeiten gewichtet, so dass das Bauteil mit der höchsten Fehlerwahrscheinlichkeit jeweils an erster Stelle steht. Der Inhalt der initialen Fehlerkandidatenlisten wird entsprechend der tatsächlichen fehlerverursachenden Bauteile bewertet.

Die Abbildung 7.10 zeigt, an welcher Position der gewichteten initialen Fehlerkandidatenliste die tatsächlichen Fehlerursachen (die fehlerverursachenden Bauteile⁷) standen. Es ist zu erkennen, dass FiDis bereits in 62% der Fälle die tatsächliche Fehlerursache von Anfang an mit der höchsten Fehlerwahrscheinlichkeit eingeschätzt hat. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 84% erscheint das fehlerverursachende Bauteil an einer der ersten 5 Stellen der gewichteten Fehlerkandidatenliste. Nur in 5% der Fälle konnte auf Grund der Symptome und strukturbeschreibenden Daten nicht auf die richtige Fehlerursache geschlossen werden.

Bei dem Vergleich der von FiDis ermittelten Fehlerkandidaten mit der natürlichsprachlichen Beschreibung der Fehlerursache besteht vielfach das Problem der unterschiedlichen Granularität der Ursachenbeschreibung. FiDis macht eine sehr feingranulare Unterscheidung. Die Beschreibung der durchgeführten Reparaturhandlungen ist wesentlich grober und enthält z.B. Aussagen wie „Leitungssatz Fahrertür instand gesetzt“. Teilweise kann anhand der Ersatzteile wie Steckergehäuse oder Stoßverbinder darauf geschlossen werden, ob es sich bei dem fehlerverursachenden Bauteil um einen Stecker oder eine Leitung handelt. FiDis betrachtet jede einzelne Leitung und jeden Stecker separat. Die Problematik mit den unterschiedlichen Granularitäten wurde bei den untersuchten Fällen nur im Zusammenhang mit Fehlern im Leitungsstrang beobachtet.

Die Abbildung 7.11 stellt die Verteilung der Fehlerwahrscheinlichkeiten der fehlerverursachenden Bauteile über alle durchgeführten Untersuchungen dar. In Fällen, in denen die grobgranulare Beschreibung der Fehlerursache auf mehrere von FiDis ermittelte Kandidaten zutrifft, wurde der Wert des Kandidaten mit der höchsten Fehlerwahrscheinlichkeit verwendet.

⁷In Fällen, in denen mehrere fehlerhafte Bauteile das Fehlverhalten ausgelöst haben, wurde das mit der höchsten Fehlerwahrscheinlichkeit gewertet.

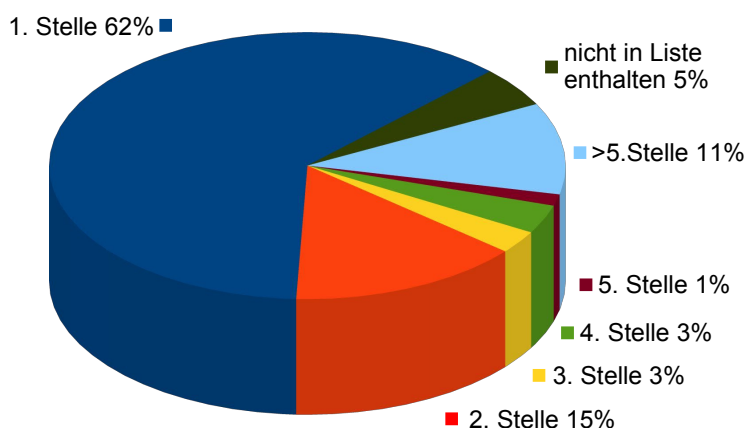


Abbildung 7.10.: Position der tatsächlichen Ursache in der initialen Fehlerkandidatenliste

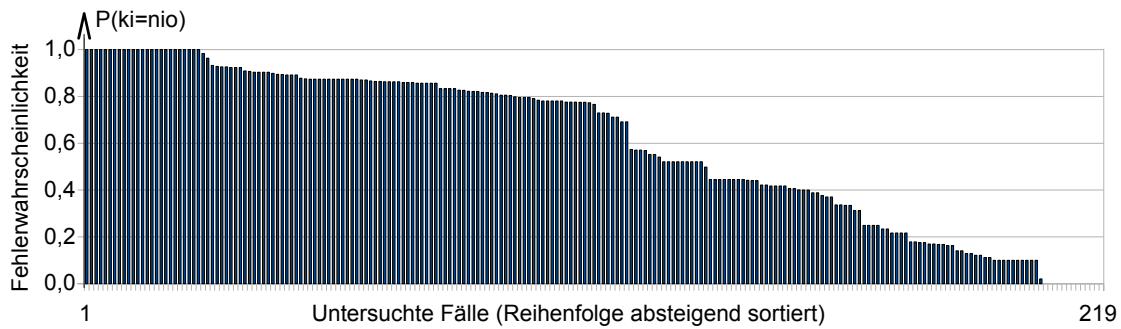


Abbildung 7.11.: Berechnete Fehlerwahrscheinlichkeiten der fehlerverursachenden Bauteile in der initialen Kandidatenliste

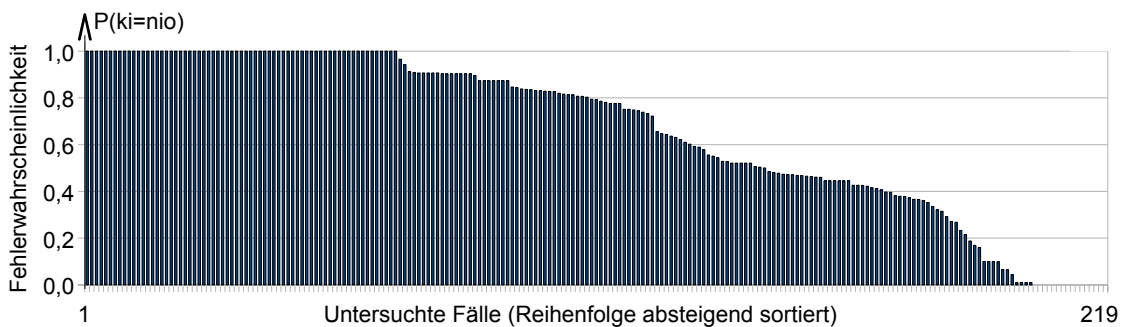


Abbildung 7.12.: Berechnete Fehlerwahrscheinlichkeiten der fehlerverursachenden Bauteile in der initialen Kandidatenliste bei verringerter Diagnosetiefe

Wenn z. B. von einem potentiell fehlerhaften Leitungsstrang nur die Fehlerwahrscheinlichkeit der Teilkomponente mit der höchsten Einzelfehlerwahrscheinlichkeit für die Bewertung verwendet wird, gibt dies kein vollständiges Bild. Um dies zu erhalten, müssen die berechneten Fehlerwahrscheinlichkeiten der übrigen Teilkomponenten des Leitungsstrangs ebenfalls berücksichtigt werden. Für die Abbildung 7.12 wurden in den betroffenen Fällen die Vereinigung der Fehlerwahrscheinlichkeiten aller am verdächtigten Leitungsstrang beteiligten Komponenten ermittelt. Die Vereinigung von mehreren unabhängigen zufälligen Ereignissen (z. B. Ausfall einer Komponente) bedeutet, dass mindestens eines der Ereignisse eingetreten ist. Die Wahrscheinlichkeit der Vereinigung entspricht der Summe der Wahrscheinlichkeiten aller enthaltenen Elemente (Formel (7.1), [Pap08]).

$$P(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_k) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_k) \quad (7.1)$$

In den Abbildungen 7.11 und 7.12 ist zu erkennen, dass die initiale Fehlerkandidatenliste das fehlerverursachende Bauteil bereits in vielen Fällen sicher identifiziert. Durch die künstliche Verringerung der Diagnosetiefe bei Fehlern in Leitungssätzen ist in Abbildung 7.12 zu sehen, dass die etwas grobere Aussage zu einer höheren Treffsicherheit führt. Vor allem bei Fehlern im Leitungsstrang reicht jedoch der Informationsgehalt der DTCs nicht aus, um ohne zusätzliche Messungen sicher auf einen bestimmten Leitungsabschnitt oder Stecker schließen zu können.

7.5.2 Inhalt und Reihenfolge der Prüfungen

Im zweiten Schritt wird untersucht, wie gut die Auswahl der generierten Prüfungen zur Fehlersuche beiträgt. Dafür wird bewertet, welcher Prüfschritt innerhalb der Prüfsequenz das fehlerverursachende Bauteil überprüft. Zunächst wird aus der Dokumentation des Reparaturfalls das fehlerverursachende Bauteil herausgesucht. Anhand des GFS-Protokolls sowie der abgerechneten Arbeitspositionen wird der geleistete Aufwand zur Fehlersuche unter Verwendung der GFS abgeschätzt. Im Anschluss daran wird die gleiche Fehlersituation mit FiDis nachgestellt und der generierten Prüfablauf bewertet. Anhand der Menge der von FiDis generierten Prüfungen bis zur Identifikation der Fehlerursache kann der notwendige Aufwand ebenfalls abgeschätzt werden.

Das Protokoll der GFS enthält alle DTCs aus dem Fahrzeug sowie alle Ein- und Ausgaben der GFS. Die einzelnen Bildschirmdialoge entsprechen jedoch nicht den Prüfschritten. So beginnen die Prüfsequenzen i. d. R. mit verschiedenen allgemeinen sowie erklärenden Hinweisen, bis schließlich Aufforderungen zur Durchführung einer Prüfung ausgegeben werden. Auch diese können sich wiederum über mehrere Bildschirmdialoge erstrecken. Es gibt jedoch auch Fälle, bei denen Hinweise zu mehreren durchzuführenden Prüfungen in einem einzigen Bildschirmdialog dargestellt werden. Bei der Interpretation der GFS-Protokolle zur Bestimmung der Anzahl der Prüfschritte muss deshalb die Semantik der Fehlersuchprogramme analysiert werden. Da dies nicht ohne Weiteres automatisiert werden kann, musste die Auswertung der GFS-Protokolle manuell erfolgen. Es wurden 136 GFS-Protokolle analysiert.

Viele Prüfanweisungen sind interaktiv. Beispielsweise wird der Mechaniker aufgefordert, eine Messung durchzuführen und das Ergebnis einzugeben. Diese Informationen lassen sich sehr gut nachvollziehen. Es ist zu erkennen, ob der Mechaniker die Prüfung tatsächlich durchgeführt hat. Anhand der eingegebenen Ergebnisse ist zu erkennen, ob durch die Prüfung ein Fehler erkannt wurde. Das Zählen der durchgeführten Schritte und eine Abschätzung des jeweiligen Aufwands bis zum Erkennen des fehlerverursachenden Bauteils lässt Rückschlüsse auf den Aufwand der Fehlersuche zu.

Einige GFS-Programme haben jedoch eher den Charakter eines Leitfadens, bei dem dem Mechaniker Hinweise zur selbständigen Fehlersuche gegeben werden. In diesen Fällen ist nicht bekannt, was und in welcher Reihenfolge der Mechaniker tatsächlich geprüft hat. Bei der Bewertung wurde angenommen, dass der Mechaniker alle Hinweise in der angegebenen Reihenfolge befolgt hat. Auf die tatsächliche Fehlerursache kann auf Grund des GFS-Protokolls in diesen Fällen nicht geschlossen werden. Dies ist nur möglich anhand der abgerechneten Reparaturhandlungen (Arbeitspositionen und Ersatzteile). Anhand der abgerechneten Arbeitspositionen lässt sich abschätzen, welche der Hinweise bis zur Identifikation der Fehlerursache befolgt wurden.

In vielen Fällen sind die Fehlersuchprogramme der GFS vergleichsweise oberflächlich. Nachdem erkannt wurde, dass es sich allem Anschein nach um einen Fehler im Leitungsstrang handelt (gemäß Tabelle 7.22 machen Kupferfehler fast 50% der elektrischen Fehler aus), gibt die GFS häufig nur den Hinweis aus, selbständig eine Leitungsprüfung nach Stromlaufplan durchzuführen. Mit wie viel Aufwand eine Prüfung nach Stromlaufplan tatsächlich verbunden ist, lässt sich nur grob abschätzen. Zunächst muss sich der Mechaniker den entsprechenden Stromlaufplan besorgen. Das Suchen und Ausdrucken des Stromlaufplans kann z.B. über das elektronische Werkstattinformationssystem ELSAwin erfolgen. Da die Stromlaufpläne nicht fahrzeugindividuell sind, enthalten sie vielfach unterschiedliche Varianten eines Systems. Der Mechaniker muss anhand des tatsächlichen Verbaus im Fahrzeug überprüfen, welche Teile des Stromlaufplans relevant sind. Bei den Auswertungen wurde davon ausgegangen, dass eine Suche mit Hilfe eines Stromlaufplans einschließlich aller Messungen im Schnitt 20 min dauert. Das Freilegen der Messpunkte ist dabei nicht berücksichtigt.

Für einen Teil der 219 untersuchten Reparaturfälle kann der in den Werkstätten entstandene Aufwand nicht geschätzt werden, da die Mechaniker die GFS nicht zur Fehlersuche verwendet haben. Dies ist in den GFS-Protokollen daran zu erkennen, dass die GFS nach dem Auslesen

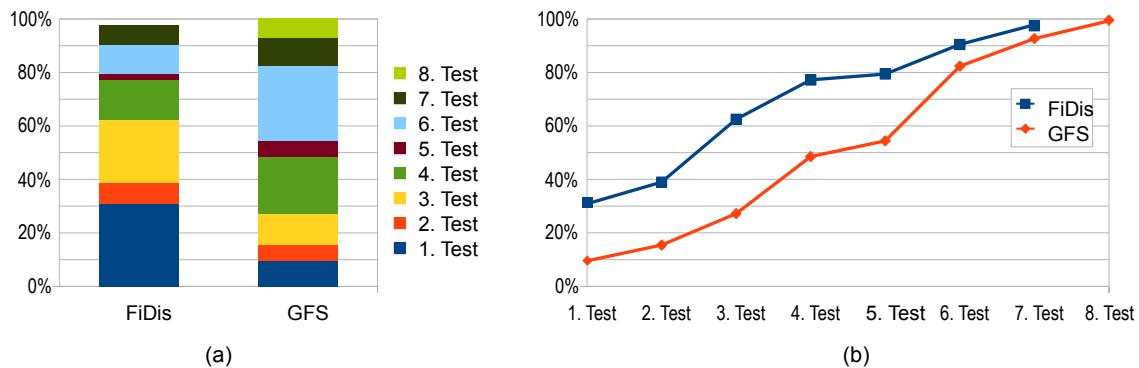


Abbildung 7.13.: Anzahl der notwendigen Prüfschritte bis zur Identifikation des Fehlerverursachenden Bauteils bei Verwendung von FiDis sowie der GFS

der DTCs oder nach einem der ersten Prüfschritte abgebrochen wurde. Da jedoch Prüf- bzw. Reparaturhandlungen abgerechnet wurden und der Fehler im Fahrzeug nicht wieder aufgetreten ist, wurde der Fehler scheinbar ohne Unterstützung der GFS gefunden. Für die Bewertung der Fehlerkandidatenermittlung können diese Fälle ohne Einschränkung verwendet werden. Für einen Vergleich zwischen GFS und FiDis bezüglich der Effizienz der Fehlersuche ist dies jedoch nicht möglich. Im Folgenden wird deshalb ein Pool von 136 Fällen untersucht.

Unabhängig vom Aufwand, der mit den einzelnen Prüfungen verbunden ist, wird im Folgenden die Anzahl der durchzuführenden Schritte bewertet. Die Abbildung 7.13.a stellt die Anzahl der Prüfschritte bis zur Identifikation der Fehlerursache mit Hilfe der GFS und FiDis gegenüber. Bei Verwendung von FiDis kann in 31% der untersuchten Fälle bereits mit dem ersten Prüfschritt die Fehlerursache gefunden werden. Bei der Verwendung der GFS sind dafür bereits drei Schritte notwendig. Bei Verwendung der GFS werden die meisten Fehler erst mit dem vierten bis sechsten Prüfschritt gefunden. Mit dem dritten Prüfschritt konnte FiDis bereits 62% der Fehlerursachen identifizieren, während dies mit der GFS nur in 28% der Fälle gelang. Im Durchschnitt waren mit der GFS 1,33 Schritte mehr notwendig als mit FiDis. Das liegt vor allem an der guten Auswahl des ersten Prüfschritts. Wie in der Abbildung zu sehen ist, konnten FiDis in 3% der untersuchten Fälle nicht zur Identifikation der Fehlerursache beitragen. Auf Grund der Auswahlkriterien (s.o.) konnte mit der GFS alle Fehlerursache identifiziert werden.

In Abbildung 7.10 ist dargestellt, dass die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung in FiDis in 51% der Fälle das fehlerverursachende Bauteil an die erste Stelle der initialen Fehlerkandidaten gesetzt hat. Wohingegen laut Abbildung 7.13 dieses Bauteil nur in 31% der Fälle auch als Erstes überprüft wurde. Diese scheinbare Verschlechterung liegt daran, dass für die Festlegung der Prüfreihefolge nicht nur die Fehlerwahrscheinlichkeit der Komponenten sondern auch der Aufwand der Prüfungen berücksichtigt wird. Bei der Betrachtung des Gesamtaufwandes zur Fehlersuche stellt sich dieses Verhalten als sehr positiv heraus. In den 20% der Fälle, in denen nicht im ersten Schritt die Komponente mit der höchsten Fehlerwahrscheinlichkeit geprüft wurde, wurden zuerst Prüfungen mit geringerem Aufwand durchgeführt. Dadurch werden alternative Fehlerquellen ausgeschlossen und die Wahrscheinlichkeit des fehlerverursachenden Bauteils wird weiter erhöht.

Im Folgenden soll der erforderliche Aufwand zur Ermittlung der Fehlerursache untersucht werden. Aus der vorliegenden Dokumentation der Reparaturfälle lässt sich der tatsächliche Aufwand zur Fehlersuche nicht exakt ableiten. Aus diesem Grund wurde zunächst ein Verfahren zur realistischen Schätzung des Prüfaufwandes entwickelt, das auf beide Systeme gleichermaßen angewendet werden kann. Die vom Mechaniker durchzuführenden Prüfungen wurden anhand des damit verbundenen Aufwandes in drei Kategorien (geringer Aufwand, mittlerer Aufwand, hoher Aufwand) eingeteilt.

1. Prüfschritte mit geringem Aufwand (ca. 5min):

- Messungen (Widerstand, Spannung, Strom) an freigelegten Steckern, wenn Stecker- / Kontaktbezeichnung sowie Sollwert bekannt sind
- Freilegen eines einfach zugänglichen Messpunktes (einschließlich Rückbau) z. B. wenn kein Ausbau von Verkleidungsteilen notwendig ist
- Komponentenprüfung einfach zu prüfender Komponenten z. B. Steckverbinder, Lampen, Sicherungen, Schalter (ohne Freilegen der Komponente)
- Durchführung von Diagnosediensten z. B. Stellgliedtest oder Messwert lesen

2. Prüfschritt mit mittlerem Aufwand (ca. 10min):

- Freilegen von Messpunkten, wobei zusätzliche Teile (z. B. Verkleidung, Räder) entfernt werden müssen (einschließlich Rückbau)
- Messung unter Verwendung zusätzlichen Equipments (z. B. Prüfadapter, Prüfboxen)
- Messung mehrerer Größen an freigelegten Steckern
- typische Komponentenprüfungen (ohne Freilegen der Komponente)

3. Prüfschritt mit hohem Aufwand (ca. 20min):

- Prüfung nach Stromlaufplan (ohne Unterstützung vom System)
- Freilegen von schwer zugänglichen Messpunkten, z. B. hinter der Schalttafel, im Sitz (einschließlich Rückbau)
- Ablassen und Neubefüllen von Betriebsmitteln wie Öl, Kühlwasser, Kältemittel

Zur Ermittlung des Gesamtaufwands werden die Aufwände der durchgeführten Prüfschritte bis zur Ermittlung des fehlerverursachenden Bauteils addiert. Für die meisten Fälle ist diese Methode zur Schätzung des Aufwandes sehr gut anwendbar. Es gibt jedoch Fälle, in denen die Fehlersuche in der Werkstatt scheinbar sehr schwierig war. In diesen Fällen wurde eine Fehlersuchzeit vom maximal 60min angenommen, auch wenn die Anzahl der von der GFS ausgegebenen Prüfanweisungen einen höheren Aufwand vermuten lässt. In diesen Fällen kann angenommen werden, dass der Mechaniker nur einen Teil der ausgegebenen Prüfungen tatsächlich durchgeführt hat. Es gibt auch Fälle, in denen der Fehler nicht bei der ersten Werkstattkonsultation gefunden wurde und das Fahrzeug nach kurzer Zeit mit den gleichen Fehlersymptomen erneut in die Werkstatt gebracht wurde. Solche Fälle wurden bewusst nicht berücksichtigt (vgl. Anfang des Abschnitts 7.5).

Die Abbildungen 7.14 und 7.15 zeigen für die Menge der untersuchten Fälle jeweils den ermittelten Aufwand unter Verwendung der GFS sowie unter Verwendung von FiDis. Die Abbildung 7.16 stellt die Differenz zwischen den geschätzten Arbeitsaufwänden dar. Ein positiver Wert bedeutet, dass die Fehlersuche mit FiDis einen höheren Aufwand verursacht hätte. Die Abbildung zeigt, dass bei den untersuchten Fällen die Verwendung von FiDis in Schnitt 16,26 Minuten eingespart hätte. Dies liegt vor allem an der gezielten Gewichtung der Prüfungen anhand der berechneten Fehlerwahrscheinlichkeiten, dem zu erwartenden Prüfaufwand und an den detaillierten fahrzeugindividuellen Prüfungen der Bordnetzkomponenten. Für die Durchführung von Komponentenprüfungen wurde bei beiden Systemen jeweils der gleiche Aufwand angenommen. Wie im Abschnitt 5.6.3 beschrieben, ist die Anwendung von Expertenwissen in Form von manuell erstellten Prüfanweisungen zur Überprüfung von komplexen Bauteilen in vielen Fällen die sinnvollste Möglichkeit. Bei Kupferfehlern (Leitungen, Stecker, Unterbrechungen, Kurzschlüsse, usw.) kann FiDis klare Vorteile gegenüber der GFS aufweisen. Dies soll an einem Beispiel verdeutlicht werden.

Beispiel: Es wird ein Fehler in einem Leitungsstrang vermutet, der ein Steuergerät mit zwei daran angeschlossenen Komponenten (z. B. Sensoren oder Aktoren) verbindet. Da die GFS-Programme sehr allgemeingültig gehalten sein müssen, schlagen sie vielfach lediglich eine Prüfung des Leitungsstrangs gemäß Stromlaufplan vor. Der Mechaniker wird sich dann den entsprechenden

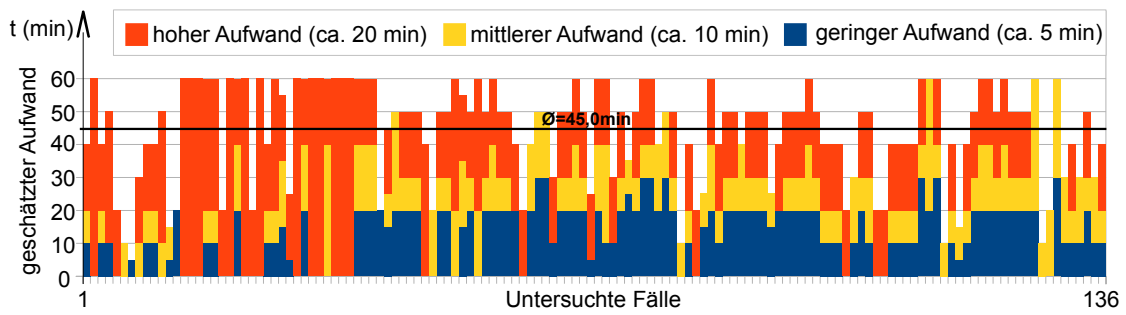


Abbildung 7.14.: Geschätzter Arbeitsaufwand bis zur Identifikation des fehlerverursachenden Bauteils aller untersuchten Fälle und deren Durchschnitt bei Verwendung der GFS

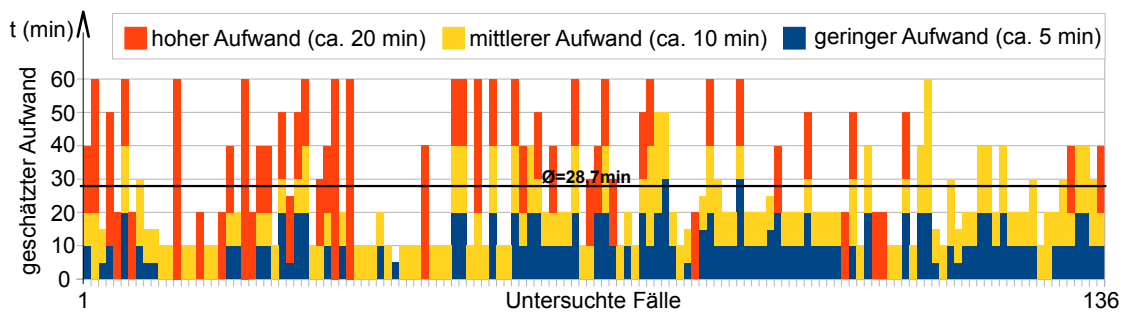


Abbildung 7.15.: Geschätzter Arbeitsaufwand bis zur Identifikation des fehlerverursachenden Bauteils aller untersuchten Fälle und deren Durchschnitt bei Verwendung von FiDis

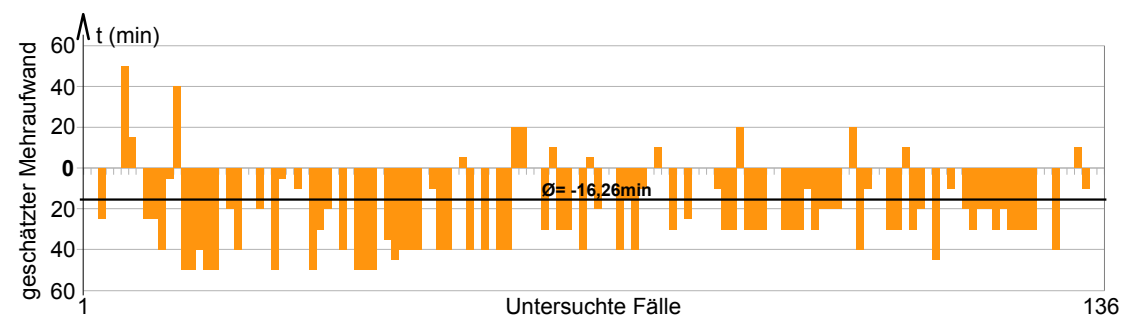


Abbildung 7.16.: Differenz der geschätzten Arbeitsaufwände aus Abb. 7.14 und 7.15 - ein positiver Wert bedeutet einen Mehraufwand bei FiDis gegenüber der GFS

Stromlaufplan besorgen, die Steckverbindungen von allen drei Komponenten entfernen und alle Leitungen mit einem Messgerät überprüfen. Wenn der Aufwand für das Freilegen der Messpunkte an den drei Komponenten mit jeweils 10min und das Durchführen der Prüfung nach Stromlaufplan mit 20min angenommen wird, dauert die Fehlersuche 50min. FiDis hingegen enthält detaillierte Informationen darüber, wie das Bordnetz in der konkreten Fahrzeugvariante beschaffen ist. Dadurch kann es für jede einzelne Leitung exakte Prüfanweisungen generieren. Durch die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung ist FiDis bekannt, welche Leitung für den Fehler verantwortlich sein könnte. Dadurch braucht der Mechaniker z.B. nur zwei Messpunkte freizulegen und eine Messung durchzuführen, für die ihm alle notwendigen Informationen (Bezeichnung der Stecker sowie der Pins, an denen gemessen werden soll) zur Verfügung gestellt werden. Wenn der Aufwand einer solchen Messung mit 5min angenommen wird, beläuft sich der Gesamtaufwand auf 25min. In diesem Beispiel nimmt eine Prüfung mit der GFS die doppelte Zeit in Anspruch.

Die Prüfanweisung „Leitungsprüfung nach Stromlaufplan“ kommt relativ häufig in der GFS vor und ist einer der Hauptgründe dafür, dass in Abbildung 7.14 viele Prüfungen mit hohem Prüfaufwand dargestellt sind. FiDis gibt in diesen Fällen konkrete Anweisungen zur Überprüfung einzelner Leitungen aus. Auch die insgesamt geringere Anzahl von Prüfanweisungen bis zur Identifikation der Fehlerursache ist in den Abbildungen 7.14 bis 7.16 deutlich zu erkennen.

Zusammenfassung der Erprobung mit Felddaten

Es konnte gezeigt werden, dass FiDis auch bei einer größeren Anzahl von realen Fehlersituationen deutliche Vorteile gegenüber bestehenden Systemen aufweist. Es wurden dokumentierte Fehlersuch- und Reparaturfälle, die mit Hilfe der GFS durchgeführt wurden, mit FiDis nachgestellt. Anschließend wurde das Verhalten beider Systeme analysiert und bewertet. Besonders auffällig ist dabei, dass FiDis in 31% der Fälle bereits mit dem ersten Prüfschritt gezielt das tatsächliche fehlerverursachende Bauteil prüft. Dies liegt vor allem an der hohen Treffsicherheit der wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung. Es wurde eine Methode zur Abschätzung des Aufwands einer Fehlersuche entwickelt. Mit deren Hilfe wurde ermittelt, dass sich der Aufwand zur Fehlersuche beim Einsatz von FiDis für die untersuchten Fälle um über 16min gegenüber der Fehlersuche mit Hilfe der GFS (45min) verringert hätte. Allein bei den untersuchten 136 Reparaturfällen würde dies einer Einsparung von 36,7 Arbeitsstunden entsprechen.

7.6 Auswertung der Evaluierung

In diesem Kapitel wurde das neu entwickelte Diagnosesystem (FiDis) mit der aktuell verwendeten GFS verglichen. Dafür kam ein dreistufiges Bewertungsverfahren zum Einsatz. In der ersten Stufe wurden die zu Grunde liegenden Konzepte verglichen. Die Untersuchungen haben ergeben, dass FiDis in bestimmten Kriterien prinzipbedingt deutliche Vorteile gegenüber der GFS hat. Die entwickelten Verfahren sind jedoch nicht für alle Arten von Fehlern geeignet. Deshalb kann FiDis die GFS nicht vollständig ersetzen, ohne dabei zu einer partiellen Verschlechterung zu führen. In der zweiten Stufe wurden die beiden Systeme unter Werkstattbedingungen verglichen. Dabei hat sich gezeigt, dass FiDis im Vergleich zur GFS in vielen Fällen mit weniger Prüfschritten auskommt. Als dritte Stufe wurden eine größere Anzahl von Reparaturfällen, welche mit Hilfe der GFS durchgeführt wurden, nachgestellt. Auch dabei konnte nachgewiesen werden, dass die in FiDis enthaltenen Algorithmen den Aufwand der Fehlersuche signifikant reduzieren können.

7.6.1 Stärken und Schwächen

FiDis ist ein System zur Diagnose elektrischer und elektronischer Systeme und ist besonders gut geeignet, um Kupferfehler, d.h. Fehler in elektrischen Leitungen, Probleme mit Steckern, der Spannungsversorgung und Massepunkten sowie Fehler in einfachen elektrischen Bauteilen

(z.B. Lampen, Schalter, Sicherungen) zu diagnostizieren. Diese Art von Fehlern verursacht in den Werkstätten den größten Aufwand bei der Fehlersuche, da sie sehr häufig vorkommen und oft schwierig zu finden sind. Bei den im Abschnitt 7.5 untersuchten Fällen wurde eine durchschnittliche Zeitersparnis von 16,3min gegenüber der Verwendung der GFS ermittelt. Knapp 50% der Fehlerfälle fielen dabei in die Kategorie Kupferfehler.

Eine weitere Stärke von FiDis ist die genaue Kenntnis aller Bordnetzkomponenten einschließlich aller variantenspezifischen Besonderheiten. Dadurch können Fehlerwahrscheinlichkeiten für alle Komponenten berechnet und sehr präzise Prüfanweisungen ausgegeben werden. Mit der GFS ist dies prinzipbedingt nicht möglich.

Nachteilig ist, dass FiDis nur für Fahrzeuge eingesetzt werden kann, für die entsprechende Daten zur Verfügung stehen. Zur Diagnose von Fehlern, die nicht elektrischer Natur sind, ist FiDis eben so wenig geeignet wie für Komponentenprüfungen, die ein hohes Maß an spezifischem Expertenwissen verlangen.

7.6.2 Kombination von FiDis mit der GFS

Die Verfahren aus FiDis und der GFS lassen sich sehr gut in einem System kombinieren. In diesem Fall kann das Diagnosesystem von den Stärken beider Systeme partizipieren. Im Abschnitt 5.6.3 wurde beschrieben, wie von Experten erstellte Prüfsequenzen zur Prüfung komplexer Bauteile in den dynamischen Prüfablauf von FiDis eingebunden werden können. Fehler, die nicht elektrischen Ursprungs sind (und somit nicht durch FiDis geprüft werden können), können bei einer Kombination beider Verfahren in einem System weiterhin unter Verwendung manuell erstellter Fehlersuchprogramme gefunden werden. Auch ältere Fahrzeuge, für die noch nicht die für FiDis notwendigen Daten zur Verfügung stehen, können mit einem solchen Diagnosesystem und den bereits bestehenden Fehlersuchprogrammen wie bisher betreut werden.

Durch die Kombination der Verfahren in einem System erhöht sich nicht zwangsläufig der Aufwand zur Erstellung und Pflege der Wissensbasis. Für alle Arten von Fehlern, die mit den FiDis-Verfahren diagnostiziert werden können, brauchen keine GFS-Programme erstellt zu werden. Dadurch reduziert sich der Aufwand auf Fälle, in denen spezielles Expertenwissen notwendig ist. Insgesamt wird der Aufwand bei der Kombination beider Systeme vermutlich deutlich geringer sein, als es bei der heutigen GFS der Fall ist.

8. | Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wurden Verfahren zur wahrscheinlichkeitsbasierten Fahrzeugdiagnose mit individueller Prüfstrategie beschrieben. In der Einleitung zu dieser Arbeit wurde die folgende Leitfrage formuliert:

Leitfrage:

Kann durch den Einsatz wahrscheinlichkeitsbasierter Verfahren und gezielter Verarbeitung von fahrzeugindividuellem Wissen die Effizienz von Diagnosesystemen verbessert werden?

Die Frage wurde mit Hilfe eines, im Rahmen der Arbeit entwickelten, Diagnosesystems beantwortet. Das entwickelte Diagnosesystem kann mit wahrscheinlichkeitsbasierten Verfahren neben allgemeinem auch fahrzeugindividuelles und fallspezifisches Wissen (vgl. Tabelle 1.1 auf S. 2) verarbeiten. Zur Bewertung der Effizienz dieses Systems wurde es mit der heute weit verbreiteten „Geführten Fehlersuche“ (GFS) verglichen.

In dieser Arbeit wurden Verfahren wie das wahrscheinlichkeitsbasierte Schließen und die Graphenanalyse auf die Problemstellung der Fahrzeugdiagnose adaptiert. Für die Problemstellung einer möglichst effizienten Fahrzeugdiagnose sind dadurch neue Verfahren entstanden. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen dokumentieren das Verhalten der entstandenen Diagnoseverfahren und machen die Vorteile gegenüber heute üblichen Verfahren deutlich. Die gewonnenen Erkenntnisse aus dieser Arbeit umfassen:

- eine Analyse ausgewählter Probleme bestehender Diagnosesysteme
- Verfahren zur wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung mittels Bayes-Netzen
- Verfahren zur Generierung von Prüfschritten für die Überprüfung elektrischer Komponenten
- Verfahren zur Ermittlung eines dynamischer Prüfplan zur effizienten Fehlersuche
- Methoden und Metriken zum Vergleich verschiedenartiger Diagnosesysteme mit dem Ziel einer effizienten Fehlersuche
- Evaluierungsergebnisse eines auf Basis der neuen Verfahren arbeitenden Diagnosesystems verglichen mit einem etablierten System

Die Ergebnisse lassen sich für die Entwicklung intelligenter Diagnosesysteme verwenden. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Kapitel 3 bis 7 zusammengefasst.

Problemanalyse

Im Kapitel 3 wurden ausgewählte Probleme bekannter Diagnosesysteme untersucht. Die Entwicklung neuer Verfahren ist nur sinnvoll, wenn dadurch reale Probleme (z. B. funktionale Einschränkungen) gelöst werden. Es wurden fünf Probleme bestehender Systeme identifiziert, für die im Folgenden Lösungen entwickelt wurden. Es wurde vermutet, dass sich eine Lösung dieser Probleme signifikant auf die Effizienz des Diagnosesystems auswirkt.

Wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung

Im Kapitel 4 wurde ein Verfahren zur wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung für elektrische Fahrzeugsysteme beschrieben. Das Verfahren verwendet ein zur Laufzeit generiertes Bayes-Netz zur Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeiten aller Komponenten im Fahrzeug. Durch die Auswertung eines fahrzeugindividuellen Datensatzes mit einer Beschreibung aller elektrischen Komponenten des Fahrzeugs (einschließlich aller Bordnetzkomponenten) werden bei der Generierung des Bayes-Netzes alle variantenspezifischen Besonderheiten berücksichtigt. Die größte Herausforderung in diesem Kapitel war die Entwicklung eines Verfahrens zur Generierung des Bayes-Netzes. Aus der elektrischen Strukturbeschreibung werden logische Wirkketten für alle potentiell möglichen Fehlersymptome abgeleitet. Dies geschieht durch logische Verknüpfungen der Fehlerzustände (i.O. und n.i.O.) mehrerer elektrisch verbundener Komponenten mit dem Symptomen. Die logischen Strukturen der Wirkketten werden in entsprechende Strukturen für ein Bayes-Netz überführt. Durch logisches Zusammenfassen von Teilen des Netzes und Einfügen zusätzlicher Knoten können die Netze soweit vereinfacht werden, dass es mit dieser Methode möglich ist, ein vollständiges Fahrzeugbordnetz in ein einziges Bayes-Netz zu überführen und dieses performant genug berechnen zu können, um es in einem interaktiven Diagnosesystem einsetzen zu können. Die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung versetzt ein Diagnosesystem in die Lage, selbständig, d. h. ohne Anwendung von Expertenwissen, von vorhandenen Symptomen auf mögliche Fehlerursachen schließen zu können.

Individuelle Generierung von Prüfschritten

Im Kapitel 5 wurden Verfahren zur individuellen Generierung von Prüfschritten beschrieben. Im Gegensatz zu heutigen Diagnosesystemen ist es damit zukünftigen intelligenten Diagnosesystemen möglich, selbständig Anweisungen zur Überprüfung von Bordnetzkomponenten zu generieren. Mit Hilfe von Durchgangsprüfungen, Spannungs- und Strommessungen können damit Leitungsunterbrechungen, Kurzschlüsse, fehlerhafte Stecker, Splices und Massepunkte identifiziert werden. Da dem Diagnosesystem eine exakte fahrzeugindividuelle Beschreibung des Bordnetzes zu Verfügung steht, sind die so generierten Prüfungen wesentlich detaillierter und fahrzeugspezifischer als die i. d. R. allgemeingültig formulierten, manuell erstellten Prüfanweisungen heutiger Diagnosesysteme.

Dynamischer Prüfablauf

Im Kapitel 6 wurden Verfahren zur Realisierung eines dynamischen Prüfablaufs beschrieben. Im Gegensatz zu manuell erstellten Fehlersuchprogrammen ist es mit diesem Verfahren möglich, eine effektive Prüfsequenz zur Laufzeit des Systems zu ermitteln. Die Prüfsequenzen werden aus den individuell generierten Prüfschritten für Bordnetzkomponenten und statisch hinterlegten Prüfungen für komplexe Bauteile zusammengesetzt. Die Kriterien für die Auswahl der Prüfungen innerhalb der Prüfsequenz sind die Fehlerwahrscheinlichkeiten der überprüften Komponenten, der mit der Durchführung der Prüfung verbundene Aufwand sowie die Ergebnisse der bisher durchgeführten Prüfungen.

Evaluierung des Diagnosesystems

Im Kapitel 7 wurde die praktische Erprobung der entwickelten Verfahren dokumentiert und bewertet. Zu diesem Zweck wurden die Verfahren in Software umgesetzt und in ein eigens dafür entwickeltes Diagnosesystem integriert. Um das entstandene System bewerten zu können, wurde im Rahmen einer vergleichenden Evaluierung eine Gegenüberstellung mit der GFS und weiteren Systemen durchgeführt. Dabei kam ein dreistufiges Evaluierungsverfahren zum Einsatz, bei dem im ersten Schritt die zugrunde liegenden Konzepte von insgesamt vier Systemen verglichen wurden. Im zweiten Schritt wurde die Erprobung unter Werkstattbedingungen durchgeführt. Dabei wurden drei Diagnosesysteme verwendet, um in einem präparierten Fahrzeug nacheinander 22 typische elektrische Fehler zu diagnostizieren. Es wurde untersucht und bewertet, wie zielgerichtet

und effizient die Fehlersuche mit den Diagnosesystemen abgelaufen ist. Im dritten Schritt wurde eine Untersuchung mit Felddaten durchgeführt. Dabei wurden Daten von insgesamt 219 abgeschlossenen Reparaturfällen von Fahrzeugen, die im Rahmen der Gewährleistung in Vertragswerkstätten repariert wurden, ausgewertet. Die untersuchten Fälle betreffen elektrische Fehler und wurden mit Hilfe der GFS diagnostiziert. Da die Diagnosesitzungen der GFS vollständig protokolliert werden, konnten die Fehler im Nachhinein mit dem neu entwickelten Diagnosesystem nachgestellt und der Ablauf der Diagnosesitzung mit dem der GFS verglichen werden.

Wie bereits bei der Problemanalyse angenommen, wirken sich die entwickelten Verfahren signifikant positiv auf die Leistungsfähigkeit und Effizienz des Diagnosesystems aus. Besonders hervorzuheben ist dabei der weitgehende Verzicht auf hinterlegtes Expertenwissen. Die Erstellung und Pflege der von Experten erstellten Fehlersuchprogramme ist ein entscheidender Kostentreiber beim Einsatz von Diagnosesystemen wie der GFS. Durch den Einsatz der neu entwickelten Verfahren bekommt das Diagnosesystem eine eigene „Intelligenz“, wodurch in den meisten Fällen auf hinterlegte Fehlersuchprogramme verzichtet werden kann.

Ein weiterer Vorteil der entwickelten Verfahren ist die Verarbeitung von fahrzeugindividuellem und fallspezifischen Wissen. Von einer bestimmten Fahrzeugbaureihe können typischerweise tausende elektrisch verschiedener Varianten gefertigt werden. Mit Hilfe der entwickelten Verfahren kann ein Diagnosesystem alle in einem Fahrzeug vorhandenen elektrischen Systeme berücksichtigen und sehr präzise Anweisungen zur Überprüfung des Bordnetzes ausgeben. Manuell erstellte Fehlersuchprogramme müssen i. d. R. sehr allgemein formuliert sein, da sie ansonsten nur für genau eine Fahrzeugvariante passen. Durch Verarbeitung von fallspezifischem Wissen werden die Ergebnisse aller bereits durchgeführten Prüfungen bei der Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeiten sowie zur Auswahl der nächsten Prüfschritte berücksichtigt.

Sowohl bei der Werkstatteprobung als auch bei den Untersuchungen mit Felddaten konnte beobachtet werden, dass mit dem neu entwickelten System die Fehlerursache im statistischen Mittel mit deutlich weniger Prüfschritten ermittelt werden kann. Dadurch und durch die Priorisierung von Prüfungen mit geringen Aufwand können die Kosten für eine Fehlersuche deutlich reduziert werden. Bei den in diesem Zusammenhang untersuchten 136 Gewährleistungsreparaturen wäre anhand einer durchgeführten Aufwandsschätzung eine durchschnittliche Einsparung von 16,3 min pro Reparaturfall möglich gewesen.

Auf Grund der Ergebnisse kann die Leitfrage mit JA beantwortet werden.

8.2 Ausblick

Der seit einigen Jahren beobachtbare Trend der Zunahme elektrischer und elektronischer Systeme im Fahrzeug wird voraussichtlich noch einige Zeit anhalten. Zurzeit wird dieser Trend vor allem durch die Einführung ökologischer Antriebskonzepte, der Optimierung des Energieverbrauchs im Fahrzeug sowie durch den zunehmenden Einsatz von Fahrerassistenzsystemen vorangetrieben. Die Weiterentwicklung der Diagnosesysteme für die Inbetriebnahme, Wartung und Instandsetzung der elektrischen Fahrzeugsysteme muss parallel dazu weiter vorangetrieben werden. Wenn dies nicht erfolgt, kann es möglicherweise zu erhöhten Gewährleistungskosten und zu einer Unzufriedenheit bei den Kunden kommen (vgl. [Hei06]).

Die im Kapitel 7 erhobenen und im letzten Abschnitt genannten Einsparpotentiale zeigen das Potential, das bereits heute durch Einsatz intelligenter Diagnosesysteme besteht. In diesem Bereich sind allein auf Grund der wirtschaftlichen Notwendigkeit in Zukunft zahlreiche weitere Innovationen zu erwarten.

Im Folgenden werden zwei Themenfelder beschrieben, die in engem Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit stehen, inhaltlich jedoch nicht behandelt wurden.

Ein tieferer Blick in die Fahrzeugsysteme

Einige Steuergeräte haben bereits heute umfangreiche und sehr spezifische Diagnosefunktionen eingebaut, die weit über die in dieser Arbeit verwendeten Funktionen zur Erkennung elektrischer Fehler in der Peripherie hinausgehen. Um diese Diagnosefunktionen bei der Fehlersuche sinnvoll einsetzen zu können, ist jedoch spezifisches Wissen über das jeweilige Fahrzeugsystem bzw. deren einzelne Funktionen und mögliche Fehlfunktionen notwendig. Um diese Art von Diagnosefunktionen richtig einsetzen zu können, ist aus heutiger Sicht ein hohes Maß an Expertenwissen notwendig. Damit zukünftig auch dafür Prüfungen automatisch generiert werden können, benötigt das Diagnosesystem Informationen über die einzelnen Funktionen im Steuergerät sowie über die funktionalen Abhängigkeiten der Systeme untereinander. Bisher stehen diese Informationen noch nicht in einer Form zu Verfügung, die eine automatische Verarbeitung in einem Prüfgenerator ermöglicht. Auch fehlen bisher die notwendigen Verfahren zur Ableitung von Handlungsanweisungen aus dieser Art von Informationen. Die Verfügbarkeit der Informationen und Verfahren könnte die Leistungsfähigkeit intelligenter Diagnosesysteme weiter erhöhen und die Notwendigkeit für manuell erstellte Fehlersuchprogramme weiter reduzieren.

Eine globale Sicht auf ein spezifisches Problem

Erfahrungsbasierte Diagnosesysteme, wie in [MKB⁺09] beschrieben, verwenden Erfahrungen aus erfolgreichen Reparaturvorgängen, um für eine spezielle Fehlersituation mögliche Fehlerursachen vorhersagen zu können. Im Gegensatz zu dem in dieser Arbeit beschriebenen System, kann ein solches auf Heuristiken basierendes Diagnosesystem nicht selbständig Fehlerkandidaten und Prüfungen ermitteln. Dafür ist es jedoch in der Lage, Ähnlichkeiten zu Fehlersituationen, die in anderen Werkstätten des weltweiten Servicenetzes zufriedenstellend gelöst wurden, zu erkennen. Die Verfahren einer solchen erfahrungsbasierten Diagnose lassen sich mit den in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren kombinieren. Dadurch kann für häufiger auftretende Fehlersituationen automatisch die Fehlerkandidatenermittlung sowie der Prüfablauf optimiert werden, wodurch sich die Effizienz der Fehlersuche mit der Zeit stetig verbessert.

A. | Tests und Ergebnisse

In diesem Anhang werden die durchgeführten Tests sowie deren Ergebnisse aus Kapiteln 4 bis 6 beschrieben. Der Abschnitt A.1 umfasst Tests der Algorithmen zur wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung aus Kapitel 4. Der Abschnitt A.2 beschreibt Tests zur individuellen Generierung von Prüfschritten. Die dazugehörigen Algorithmen wurden im Kapitel 5 beschrieben. Die Verfahren aus Kapitel 6 (dynamischer Prüfablauf) werden durch die Tests im Abschnitt A.3 überprüft.

Insgesamt sind in diesem Anhang 15 Testfälle dokumentiert. Jeder einzelne Testfall ist dabei folgendermaßen strukturiert:

- **Zu untersuchende Eigenschaften:** Zuerst wird angegeben, was das Ziel der Untersuchung ist und welche Eigenschaften des Systems damit überprüft werden sollen.
- **Szenario:** Hier werden die Randbedingungen der Untersuchung beschrieben. Das betrifft vor allem die Eingangsdaten sowie die Konfiguration des Systems.
- **Beschreibung:** Dieser Abschnitt enthält detaillierte Informationen darüber, wie genau die Untersuchung abläuft.
- **Erwartung:** Hier werden die erwarteten Ergebnisse auf Grund des geforderten Verhaltens dargestellt.
- **Ergebnis:** In diesem Abschnitt wird das tatsächlich beobachtete Verhalten des Systems beschrieben.
- **Bewertung:** Im Abschnitt Bewertung wird eine Aussage darüber getroffen, ob die Ergebnisse der Untersuchung mit den Erwartungen übereinstimmen und damit die Anforderungen erfüllt sind. Die Bewertung kann entweder *Bestanden* oder *nicht Bestanden* lauten.

Zu einer vollständigen Testfallbeschreibung fehlt noch die Dokumentation der Anforderungen, welche durch diesen Testfall geprüft werden. Zu Gunsten der besseren Lesbarkeit wurde die Zuordnung der Testfälle zu den Anforderungen im jeweiligen Kapitel, in dem auch die Anforderungen und Umsetzungen beschrieben sind, durchgeführt.

A.1 Test der Fehlerkandidatenermittlung

In diesem Abschnitt werden die entwickelten Verfahren zur wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung praktisch untersucht. Zu diesem Zweck wurden alle beschriebenen Verfahren in Software umgesetzt. Ziel des Tests ist es, anhand von Prüfungen und Bewertungen zu zeigen, dass die im Kapitel 4 beschriebenen Verfahren die in Abschnitt 4.1 gestellten Anforderungen erfüllen. Die Tabelle 4.8 auf Seite 58 stellt den Zusammenhang zwischen den Anforderungen und den Testfällen dar.

A.1.1 Prüfung der Grundfunktionen

Zu untersuchende Eigenschaften:

1. Erzeugen einer gewichteten Fehlerkandidatenliste unter Berücksichtigung von:

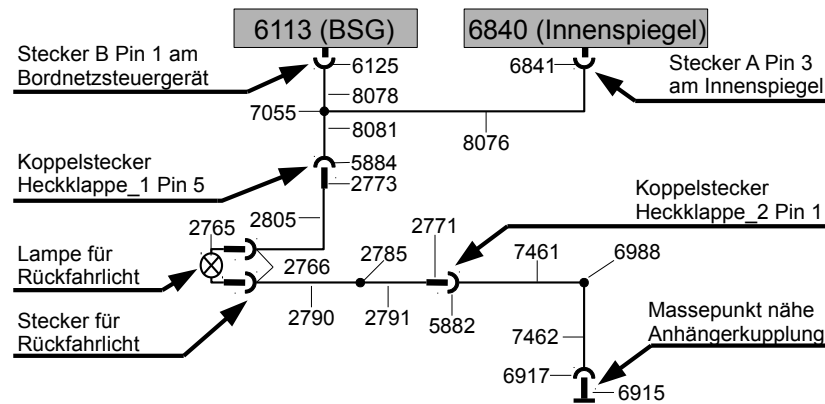


Abbildung A.1.: Darstellung der strukturbeschreibenden Daten für Prüfung A.1.1 als Stromlaufplan

- variantenspezifischen Besonderheiten
 - Fehlersymptomen (DTCs der On-Board-Diagnose)
2. Berücksichtigung der A-Priori-Wahrscheinlichkeiten bei der Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeiten
 3. Aktualisierung der Fehlerkandidatenliste nach Eingabe von Prüfergebnissen (i.O. oder n.i.O. von Bauteilen)

Szenario: Dem System steht ein Datensatz mit strukturbeschreibenden Daten eines VW Golf aus dem Jahr 2006 zur Verfügung. Eine Sonderausstattung dieses Fahrzeugs ist der automatisch abblendende Rückspiegel. Der Spiegel ist elektrisch mit dem Rückfahrscheinwerfer verbunden, damit er nicht abblendet, wenn das Fahrzeug z. B. rückwärts in eine beleuchtete Einfahrt fährt. Als einziges Fehlersymptom wird der DTC 1519 im Bordnetzsteuergerät verwendet. Der DTC bedeutet, dass das Steuergerät einen elektrischen Fehler bei der Ansteuerung des Rückfahrscheinwerfers erkannt hat. Die Abbildung A.1 stellt die strukturbeschreibenden Daten als Stromlaufplan dar.

Teilprüfung 1

Beschreibung: In das Diagnosesystem wird eine XML-Datei eingelesen, die eine gültige Fahrgestellnummer und den DTC 1519 im Bordnetzsteuergerät enthält. Anschließend wird die Ausgabe (gewichtete Fehlerkandidatenliste) bewertet.

Erwartung: Nachdem das Diagnosesystem den zur Fahrgestellnummer passenden Struktur-Datensatz eingelesen hat, soll ein Bayes-Netz generiert werden. Mit dessen Hilfe soll eine gewichtete Liste mit Fehlerkandidaten erzeugt und ausgegeben werden. Die Fehlerkandidaten einschließlich ihrer Wahrscheinlichkeit sollten bezüglich der Fahrzeugvariante und des Fehlersymptoms schlüssig sein.

Ergebnis: Die zehn wahrscheinlichsten vom Bayes-Netz ermittelten Fehlerkandidaten sind in der Tabelle A.1 dargestellt.

Die Glühlampe des Rückfahrscheinwerfers hat eine wesentlich höhere A-Priori-Ausfallwahrscheinlichkeit als die übrigen verdächtigten Bauteile. Dadurch wurde sie von den Fehlerkandidaten am stärksten gewichtet und sollte als erstes kontrolliert werden. Bereits an zweiter Stelle wird der Innenspiegel verdächtig. Dies zeigt, dass diese Sonderausstattung bei der Fehlerkandidatenermittlung berücksichtigt wurde.

#	Fehlerkandidat	Fehlerwahrscheinlichkeit
1	Lampe für Rückfahrlicht	0,73
2	automatisch abblendbarer Innenspiegel	0,118
3	Koppelstecker Heckklappe_1 (2773)	0,079
4	Massepunkt nahe Anhängerkupplung	0,052
5	Koppelstecker Heckklappe_1 (5884)	0,035
6	Stecker B am Bordnetzsteuergerät	0,035
7	Stecker für Rückfahrlicht	0,035
8	Stecker Innenspiegel	0,035
9	Splice 7055	0,021
10	Bordnetzsteuergerät	0,016

Tabelle A.1.: Die zehn wahrscheinlichsten Fehlerkandidaten auf Grund des DTC 1519

#	Fehlerkandidat	Fehlerwahrscheinlichkeit
1	automatisch abblendbarer Innenspiegel	0,241
2	Koppelstecker Heckklappe_1 (2773)	0,166
3	Massepunkt nahe Anhängerkupplung	0,108
4	Koppelstecker Heckklappe_1 (5884)	0,074
5	Stecker B am Bordnetzsteuergerät	0,074

Tabelle A.2.: Die 5 wahrscheinlichsten Fehlerkandidaten nachdem zwei Bauteile überprüft wurden**Bewertung:****Bestanden**

- Das Diagnosesystem hat eine mit Wahrscheinlichkeiten gewichtete Liste mit Fehlerkandidaten generiert (Tabelle A.1).
- Der DTC wurde als Fehlersymptom interpretiert. Die ermittelten Fehlerkandidaten sind bezüglich dieses Symptoms plausibel.
- Die unterschiedlich hohen Ausfallwahrscheinlichkeiten der Komponenten wurden bei der Gewichtung sinnvoll berücksichtigt.

Teilprüfung 2:

Beschreibung: Die Lampe sowie der Stecker der Lampe wurden überprüft und als fehlerfrei angenommen. Dieses Ergebnis wird dem Diagnosesystem mitgeteilt und die aktualisierte Fehlerkandidatenliste bewertet.

Erwartung: Auf Grund der Information, dass zwei der verdächtigten Fehlerkandidaten intakt sind, muss das Diagnosesystem die Fehlerkandidatenliste aktualisieren. Danach sollten die zwei Fehlerkandidaten nicht mehr enthalten sein. Die Fehlerwahrscheinlichkeit der übrigen Kandidaten sollte höher sein als im ersten Schritt.

Ergebnis: Die Tabelle A.2 zeigt die gewichtete Fehlerkandidatenliste nach Eingabe der Prüfergebnisse. Die bereits überprüften Komponenten sind nicht mehr in der Fehlerkandidatenliste enthalten. Die Wahrscheinlichkeit der in der Liste verbliebenen Kandidaten ist gegenüber der Tabelle A.1 gestiegen. Der Innenspiegel wird jetzt vom System als wahrscheinlichste Fehlerursache angesehen.

Bewertung:**Bestanden**

Da der automatisch abblendende Innenspiegel in diesem Fahrzeug nicht sehr verbreitet ist, hätten

#	Fehlerkandidat	Fehlerwahrscheinlichkeit
1	automatisch abblendbarer Innenspiegel	1,0
2	Koppelstecker Heckklappe_1 (2773)	0,051
3	Massepunkt nahe Anhängerkupplung	0,034
4	Koppelstecker Heckklappe_1 (5884)	0,023
5	Stecker B am Bordnetzsteuergerät	0,023

Tabelle A.3.: Die 5 wahrscheinlichsten Fehlerkandidaten nach dem ein fehlerhaftes Bauteil identifiziert wurden

viele Mechaniker ihn wahrscheinlich gar nicht als möglichen Fehlerkandidaten betrachtet. Da das Diagnosesystem jedoch die genaue Ausstattung des Fahrzeugs kennt, schlägt sie den Spiegel nun als wahrscheinlichsten Kandidaten vor.

Teilprüfung 3:

Beschreibung: Dem Diagnosesystem wird mitgeteilt, dass bei der Überprüfung des abblendbaren Innenspiegels ein Defekt festgestellt wurde. Die Fehlerkandidatenliste wird darauf hin neu berechnet und bewertet.

Erwartung: Da ein Bauteil als fehlerhaft identifiziert wurde, muss dessen Fehlerwahrscheinlichkeit 1,0 betragen. Die Wahrscheinlichkeit der übrigen Fehlerkandidaten muss sich gegenüber Tabelle A.2 signifikant verringern. Die Wahrscheinlichkeiten dürfen jedoch nicht 0.0 betragen, da Mehrfachfehler (mehr als ein fehlerhaftes Bauteil) nicht ausgeschlossen werden können.

Ergebnis: Die Tabelle A.3 zeigt die gewichtete Fehlerkandidatenliste nach Eingabe des Prüfergebnisses. Die Menge und die Reihenfolge der Fehlerkandidaten ist verglichen mit Tabelle A.2 gleich geblieben. Die Wahrscheinlichkeiten haben sich gemäß den Erwartungen verändert.

Bewertung:

Bestanden

- Die Fehlerwahrscheinlichkeit des fehlerhaften Bauteils beträgt nach der Aktualisierung 1,0.
- Für die verbleibenden Kandidaten wurde eine wesentlich geringere Fehlerwahrscheinlichkeit berechnet als zuvor.

A.1.2 Prüfung mit komplexem Fehlerbild

Zu untersuchende Eigenschaften:

1. Berücksichtigung mehrerer Fehlersymptome zur Ermittlung der Fehlerkandidaten
2. Unterschiede bei der Gewichtung der Fehlerkandidaten, wenn:
 - jedes Fehlersymptom separat behandelt oder
 - alle Symptome gemeinsam behandelt werden.
3. Gewichtung der Fehlerkandidaten, die mehrere/alle Symptome erklären könnten

Szenario: Es wird ein Fehlerszenario mit drei sporadischen Fehlern in drei unterschiedlichen Steuergeräten untersucht. Dem System steht ein Datensatz mit strukturbeschreibenden Daten eines VW Golf aus dem Jahr 2006 zur Verfügung. Das Bordnetzsteuergerät (BSG) enthält den DTC 926, das Steuergerät für die elektrische Servolenkung enthält den DTC 668 und das Airbagsteuergerät enthält den DTC 532. Die drei DTCs deuten jeweils an, dass das betreffende Steuergerät Probleme mit der Versorgungsspannung (Klemme 30) erkannt hat (z. B. einen Wackelkontakt).

#	Fehlerkandidat	Fehlerwahrscheinlichkeit
Bordnetzsteuergerät (BSG)		
1	Sicherung 4	0,180
2	Sicherung 47	0,178
3	Sicherung 48	0,178
4	Stecker F am BSG	0,177
5	Stecker D am BSG	0,155
Lenkhilfe		
1	Sicherung 2	0,325
2	Stecker ECU Lenkhilfe	0,289
3	Massepunkt Lenkung	0,207
4	Sicherungshalter B	0,122
5	Masseverbindung Lenkung	0,035
Airbag		
1	Sicherung 3	0,140
2	Koppelstelle Beifahrerseite	0,137
3	Koppelstelle Fahrerseite	0,137
4	Splice im Kabelstrang	0,039
5	Bauteilleitung	0,025

Tabelle A.4.: Ergebnisse bei separater Betrachtung der Symptome

#	Fehlerkandidat	Fehlerwahrscheinlichkeit
1	Sicherungshalter B	0,3
2	Sicherung 47	0,148
3	Sicherung 48	0,148
4	Stecker F am BSG	0,147
5	Stecker D am BSG	0,46

Tabelle A.5.: Ergebnisse bei gemeinsamer Betrachtung der Symptome

Beschreibung: Im ersten Schritt wird über die grafische Benutzerschnittstelle jeweils nur eines der drei Fehlersymptome in das Diagnosesystem eingegeben und die Ausgabe (gewichtete Fehlerkandidatenliste) notiert.

Im zweiten Schritt werden alle drei Fehlersymptome zusammen eingegeben und es werden die Fehlerkandidaten unter Berücksichtigung aller drei Symptome ermittelt. Die Ergebnisse des ersten und zweiten Schritts werden anschließend verglichen und bewertet.

Erwartung: Die Ursache für einen Wackelkontakt in der Stromversorgung ist in dem meisten Fällen sehr schwierig zu ermitteln. Potentiell können alle elektrischen Bauteile zwischen dem Steuergerät und der Batterie sowie zwischen dem Steuergerät und der Fahrzeugmasse diese Fehler verursachen. Dazu gehören u. a. Sicherungen, Sicherungshalter, Leitungen, Stecker und Massepunkte. Da der Fehler im konkreten Fall jedoch von 3 der 17 verbauten Steuergeräte erkannt wurde, sollte das Diagnosesystem vor allem Bauteile verdächtigen, von denen die Funktion aller drei Systeme abhängt.

Ergebnis: Die Ergebnisse von Schritt 1 sind in Tabelle A.4 dargestellt. Der obere Teil der Abbildung zeigt die fünf wahrscheinlichsten Fehlerkandidaten, wenn dem Diagnosesystem lediglich der Fehler des Bordnetzsteuergeräts bekannt ist. Der mittlere und untere Teil zeigt das Gleiche für die beiden anderen Steuergeräte. Die Tabelle A.5 zeigt die fünf wahrscheinlichsten Fehlerkandidaten, wenn dem System alle drei Symptome gleichzeitig übergeben werden.

Bewertung:

Bestanden

Die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung kann mit Hilfe des Bayes-Netzes von mehreren Symptomen auf eine gemeinsame Ursachen schließen. In Tabelle A.5 ist zu erkennen, dass das Diagnosesystem auf Grund der drei Symptome ein Bauteil (Sicherungshalter B) am stärksten verdächtigt. Dieses hat bei der Einzelbetrachtung der Symptome (auf Grund der geringen A-Priori-Wahrscheinlichkeit des Bauteils) nur in einem Fall zu den Top-fünf-Fehlerkandidaten gehört.

Dadurch, dass der Sicherungshalter jedoch durch alle drei Fehlersymptome belastet wird, ist die ermittelte Fehlerwahrscheinlichkeit höher als die der verdächtigsten Sicherungen, obwohl diese eine wesentlich höhere A-Priori-Wahrscheinlichkeit haben. Das Verhalten zeigt die Fähigkeit der wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung, mehrere unabhängige Fehlersymptome gemeinsam interpretieren zu können.

A.1.3 Unabhängige Fehler mit manueller Symptomeingabe

Zu untersuchende Eigenschaften: Neben der Auswertung von DTCs als Fehlersymptome, soll das Diagnosesystem auch die Eingabe von Kundenwahrnehmungen bei der Ermittlung von Fehlerkandidaten berücksichtigen. Weiterhin soll untersucht werden, ob bei der Eingabe von unabhängigen Fehlersymptomen (aus verschiedenen Fahrzeugsystemen) auch unabhängige Cluster von Fehlerkandidaten abgeleitet werden.

Szenario: Es wird der gleiche Datensatz wie in Abschnitt A.1.1 verwendet. Dem Diagnosesystem wird als Fehlersymptom ein DTC aus dem Motorsteuergerät gegeben, der einen elektrischen Fehler bei der Ansteuerung des AGR-Ventils beschreibt. Weiterhin wird das Nichtfunktionieren der Zigarettenanzünderbeleuchtung als Kundenbeanstandung eingegeben.

Beschreibung: Die Beleuchtung des Zigarettenanzünders wird von der On-Board-Diagnose nicht separat diagnostiziert, so dass es keinen DTC für diesen Fehlerfall gibt. Der betreffende Strompfad liegt parallel zu denen anderer beleuchteter Bedienelemente in der Schalttafel. Um die Kundenbeanstandung dennoch als Fehlersymptom auswerten zu können, wurde der Strompfad der Zigarettenanzünderbeleuchtung als separate Wirkkette mit der entsprechenden Kundenbeanstandung verknüpft. Nachdem dem Diagnosesystem beide Fehlersymptome bekannt gegeben und die Fehlerkandidatenliste berechnet wurde, wird die Glühlampe am Zigarettenanzünder überprüft. Nach Eingabe des Prüfergebnisses (Lampe defekt), wird die Fehlerkandidatenliste aktualisiert.

Erwartung: Da zwei unterschiedliche Symptome in das Diagnosesystem eingegeben wurden, sollte dieses die Fehlerkandidaten in zwei Cluster aufteilen. Da die betreffenden Systeme elektrisch unabhängig voneinander sind, sollte die Erkenntnis, dass die Glühlampe defekt ist, lediglich Auswirkungen auf die Fehlerwahrscheinlichkeiten des eigenen Clusters haben.

Ergebnis: Die Tabelle A.6 stellt in der Spalte *Schritt 1* die geclusterte Fehlerkandidatenliste nach Eingabe der beiden Fehlersymptome dar. Nachdem der Zigarettenanzünder (bzw. die Glühlampe darin) überprüft und als defekt erkannt wurde, wurde die Fehlerkandidatenliste erneut berechnet. Das Ergebnis ist in der Spalte *Schritt 2* dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich zwischen Schritt 1 und 2 lediglich der obere Cluster (welcher das überprüfte Bauteil enthält) geändert hat.

Bewertung:

Bestanden

Das Diagnosesystem kann beide Arten von Fehlersymptomen gleichermaßen verarbeiten. Die Fehlerkandidaten werden zu Clustern zusammengefasst. Die Feststellung, dass der Zigarettenanzünder defekt ist, hat keinen Einfluss auf die Fehlerwahrscheinlichkeiten des anderen Clusters.

#	Fehlerkandidat	Schritt 1	Schritt 2
Kundenbeanstandung: Zigarettenanzünder, keine Beleuchtung			
1	beleuchteter Zigarettenanzünder	0,603	1,0
2	Stecker Zigarettenanzünder	0,256	0,045
3	Splice 7011	0,077	0,013
4	Splice 6986	0,059	0,009
5	Leitung 12204	0,031	0,02
6	Leitung 7573	0,031	0,02
7	Leitung 7585	0,031	0,02
8	Bordnetzsteuergerät	0,023	0,015
DTC: Ansteuerung AGR-Ventil, Unterbrechung			
1	AGR-Ventil	0,517	0,517
2	Sicherung B29	0,229	0,229
3	Stecker AGR-Ventil	0,218	0,218
4	Splice 11771	0,065	0,065
5	Leitung 11837	0,029	0,029
6	Leitung 11776	0,029	0,029
7	Leitung 11839	0,029	0,029
8	Motorsteuergerät	0,022	0,022

Tabelle A.6.: Fehlerkandidatenliste mit zwei Clustern - Schritt 1: Wahrscheinlichkeiten auf Grund der Symptome, Schritt 2: Wahrscheinlichkeiten nach Überprüfung des Zigarettenanzünders

A.1.4 Einfluss von Fehlern in Strukturdaten

Zu untersuchende Eigenschaften: Im Folgenden wird untersucht, welchen Einfluss Fehler bzw. Ungenauigkeiten in der Strukturbeschreibung auf das Ergebnis des Diagnosesystems haben.

Beschreibung: Aus dem im Abschnitt A.1.1 verwendeten Datensatz wird die elektrische Verbindung zwischen dem BSG und dem abblendbaren Innenspiegel entfernt. Dies ist gleichbedeutend mit der Tatsache, dass das Ausstattungsmerkmal (abblendbarer Innenspiegel) nicht verbaut ist. Das Diagnosesystem geht dadurch bezüglich der Ausstattung des Fahrzeugs von falschen Tatsachen aus.

Erwartung: Das Diagnosesystem wird weder den Spiegel noch den Stecker oder die Leitungen als potentielle Fehlerkandidaten erkennen und in die Fehlerkandidatenliste aufnehmen.

Ergebnis: Die Tabelle A.7 zeigt die ermittelte Fehlerkandidatenliste, auf Grund des Symptoms DTC 1519. Wie zu erwarten, werden der Spiegel samt Stecker und Leitungen nicht mehr verdächtigt.

Bewertung: **mit Einschränkung bestanden**
Für ein Fahrzeug ohne automatisch abblendbaren Innenspiegel wäre das Ergebnis korrekt. Daher ist die Prüfung bestanden. Da jedoch ein Fehler in den Daten vorliegt und das Fahrzeug in Wirklichkeit einen solchen Spiegel besitzt, ist das Ergebnis unvollständig. Wäre der Spiegel im umgekehrten Fall im Datensatz, jedoch nicht im Fahrzeug, würde ein Ergebnis wie in Tabelle A.1 ausgegeben werden. Dies wäre ebenfalls nicht richtig. Die Einschränkung besagt deshalb, dass das tatsächliche Fahrzeug dem Datensatz entsprechen muss, damit das Ergebnis korrekt ist.

#	Fehlerkandidat	Fehlerwahrscheinlichkeit
1	Lampe Rückfahrlicht	0,78
2	Koppelstecker Heckklappe (Klappe)	0,085
3	Massepunkt nahe Anhängerkupplung	0,056
4	Koppelstecker Heckklappe (Karosse)	0,038
5	Stecker B am Bordnetzsteuergerät	0,038

Tabelle A.7.: Ergebnisse der Fehlerkandidatenermittlung (im vgl. zu Tabelle A.1), wenn die Strukturdaten nicht genau zum Fahrzeug passen

Das Beispiel zeigt, wie wichtig es ist, dass der verwendete Datensatz alle variantenspezifischen Besonderheiten des Fahrzeugs berücksichtigt. Andernfalls besteht die Gefahr, dass das fehlerverursachende Bauteil nicht erkannt wird oder Bauteile verdächtigt werden, die im konkreten Fahrzeug nicht vorhanden sind.

A.1.5 Einfluss von Fehlern in Felddaten

Zu untersuchende Eigenschaften: Im Folgenden wird der Einfluss von Fehlern bzw. Ungenauigkeiten bei den Felddaten auf die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung untersucht.

Beschreibung: Das Diagnosesystem soll viermal die Fehlerkandidaten für den DTC 1519 berechnen. Dabei werden jedes Mal die Ausfallwahrscheinlichkeiten der betroffenen Bauteile variiert. Das Fahrzeug sowie alle anderen Daten entsprechen dem Abschnitt A.1.1. Die Tabelle A.8 gibt für die fünf Fehlerkandidaten (vgl. Tabelle A.1) vier verschiedene Sets von A-Priori-Wahrscheinlichkeiten an. Das Set 1 entspricht sinnvollen Werten, wie sie auch im Abschnitt A.1.1 verwendet wurden. Im Set 2 wurden die Ausfallwahrscheinlichkeiten aller Komponenten verdoppelt. Das Set 3 enthält eine abgeänderte Wahrscheinlichkeitsverteilung. Im Set 4 wird für alle Komponenten die gleiche Wahrscheinlichkeit angenommen. Dies entspricht dem Verhalten, wenn dem Diagnosesystem keine Daten vorliegen.

Erwartung: Die Menge der als Fehlerkandidaten in Frage kommenden Bauteile ist abhängig von der Struktur des zu diagnostizierenden Systems. Die Ausfallwahrscheinlichkeit der Komponenten hat lediglich einen Einfluss auf die Ermittlung der Fehlerwahrscheinlichkeit. Demnach sollten die fünf Fehlerkandidaten (aus Tabelle A.1) bei allen vier Sets mit einer signifikanten Fehlerwahrscheinlichkeit verdächtigt werden. Die berechnete Fehlerwahrscheinlichkeit wird jedoch variieren.

Ergebnis: Die Fehlerkandidatenliste wurde jeweils mit einem anderen Set an Wahrscheinlichkeiten insgesamt viermal berechnet. Das Ergebnis ist in Tabelle A.9 dargestellt. Das Set 2 bewirkt, dass die berechneten Wahrscheinlichkeiten aller Fehlerkandidaten gegenüber der

Bauteil	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4
Lampe Rückfahrlicht	0,25	0,5	0,2	0,1
automatisch abblendbarer Innenspiegel	0,05	0,1	0,04	0,1
Koppelstecker Heckklappe	0,045	0,09	0,05	0,1
Stecker B am Bordnetzsteuergerät	0,04	0,08	0,05	0,1
Stecker Rückfahrlicht	0,04	0,08	0,05	0,1

Tabelle A.8.: Variation der Ausfallwahrscheinlichkeiten

Fehlerkandidat	Fehlerwahrscheinlichkeit
Lampe Rückfahrlicht	Set 1 0,49
	Set 2 0,69
	Set 3 0,42
	Set 4 0,19
automatisch abblendbarer Innenspiegel	Set 1 0,1
	Set 2 0,14
	Set 3 0,08
	Set 4 0,19
Koppelstecker Heckklappe	Set 1 0,1
	Set 2 0,13
	Set 3 0,11
	Set 4 0,19
Stecker B am Bordnetzsteuergerät	Set 1 0,09
	Set 2 0,11
	Set 3 0,11
	Set 4 0,19
Stecker Rückfahrlicht	Set 1 0,08
	Set 2 0,11
	Set 3 0,11
	Set 4 0,19

Tabelle A.9.: Einfluss der Ausfallwahrscheinlichkeiten auf die Gewichtung der Fehlerkandidaten

Berechnung mit Set 1 höher ist. Die Reihenfolge innerhalb der gewichteten Fehlerkandidatenliste bleibt jedoch die Gleiche, so dass dies keinen signifikanten Einfluss auf die Funktion der Fehlerkandidatenermittlung hat. Wäre die Ausfallwahrscheinlichkeit aller Komponenten und nicht nur der genannten fünf angehoben worden, wären die berechneten Fehlerwahrscheinlichkeiten gleich geblieben.

Bei den Berechnungen mit dem Set 3 ergibt sich eine andere Wahrscheinlichkeitsverteilung. Da z. B. die drei Stecker eine höhere A-Priori-Wahrscheinlichkeit haben als der Spiegel, werden sie in der Fehlerkandidatenliste auch stärker gewichtet. Wenn die Fehlerkandidaten nach ihrer Wahrscheinlichkeit gewichtet werden, erscheint der Spiegel dadurch an fünfter statt an zweiter Position. Im Gegensatz zur Tabelle A.7 wird der Spiegel jedoch weiterhin verdächtigt. Die Fehlersuche wird dadurch eventuell weniger effizient, es werden jedoch alle potentiellen Fehlerkandidaten berücksichtigt.

Das Set 4 repräsentiert eine Situation, in der das Diagnosesystem keine A-Priori-Wahrscheinlichkeiten kennt. Dadurch werden die Fehlerkandidaten gleich stark gewichtet. Eine unterschiedliche Fehlerwahrscheinlichkeit würde jedoch entstehen, wenn Teile der Fehlerkandidatenmenge durch unterschiedliche Symptome belastet werden, oder wenn durch bereits durchgeführte Messungen Teile der Fehlerkandidatenmenge belastet oder entlastet werden. Aber auch wenn keine Gewichtung der Fehlerkandidaten vorliegt, werden auf Grund der Strukturdaten die richtigen Bauteile in die Fehlerkandidatenliste aufgenommen.

Bewertung:

Bestanden

Es lässt sich feststellen, dass sich Ungenauigkeiten oder Fehler in den Felddaten wesentlich weniger negativ auf das Ergebnis der wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung auswirkt als Fehler in den strukturbeschreibenden Daten. Somit liefert das System auch bei ungenauen oder unvollständigen Ausfallwahrscheinlichkeiten keine falschen Ergebnisse und stellt weiterhin eine Hilfe bei der Fehlersuche dar. Ohne entsprechende Wahrscheinlichkeiten wird das

Potenzial der wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung allerdings nur zu einem geringen Teil ausgenutzt.

A.1.6 Speicherbedarf der Netze

Eine der größten Herausforderung bei der Entwicklung der wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung bestand darin, die notwendigen Bayes-Netze berechenbar zu machen. Um eine ganzheitliche Diagnose zu ermöglichen, muss das Bayes-Netz auf Grund hunderter Fehlersymptome die Fehlerwahrscheinlichkeit von über 1000 elektrischen Bauteilen berechnen können. Die kritische Größe bei komplexen Bayes-Netzen ist der Bedarf an Speicher, der für die Berechnung benötigt wird. Da die Berechnung innerhalb enger zeitlicher Grenzen erfolgen soll, muss sie komplett im Hauptspeicher ausgeführt werden können.

Im Abschnitt 2.2.4 wurden die Daten beschrieben, die jeder Knoten für die Berechnung benötigt. Für ein Bayes-Netz können leicht mehrere Gigabyte Speicher (RAM) für die Berechnung notwendig werden. Ziel der Optimierung in diesem Kapitel war es, die Netze überhaupt berechenbar zu machen und den notwendigen Speicherbedarf auf ein Minimum zu reduzieren.

Der Speicherbedarf wird hauptsächlich durch den Umfang der Wahrscheinlichkeitstabellen bestimmt. Der exakte Bedarf an Speicher hängt jedoch von der konkreten Implementierung des Bayes-Netz-Algorithmus ab. Mit Hilfe der TCS (vgl. Abschnitt 4.4.2) eines Netzes kann der notwendige Speicherbedarf unabhängig von der Implementierung abgeschätzt werden.

Beschreibung: Um die Optimierung zu bewerten, werden im ersten Schritt fünf Bayes-Netze genauer untersucht. Die Netze wurden aus den Strukturdaten von fünf unterschiedlich ausgestatteten VW Golf des Modelljahrs 2006 generiert. Es wird zu jedem Strukturdatensatz die TCS ohne und mit Optimierung ermittelt. Bei der Optimierung wird eine Elternzahl von zwei verwendet. Im zweiten Schritt wird bei der Optimierung eines Netzes die Elternzahl variiert und die Veränderung der TCS beobachtet.

Erwartung: Die optimierten Bayes-Netze sollten eine TCS kleiner 10^6 haben¹, damit sie hinreichend schnell berechnet werden können. Vor dem Optimierungsschritt kann der Wert wesentlich größer sein. Ab einer Elternzahl größer 3 wird die TCS deutlich ansteigen.

Ergebnis: Die Tabelle A.10 gibt zu jedem Strukturdatensatz die Anzahl der verbauten Steuergeräte (ECUs), die Anzahl der elektrischen Bauteile, die Menge der Fehlersymptome (DTCs) und die diagnostizierbaren Wirkketten sowie die TCS vor und nach der Optimierung an. Darüber hinaus wird die Anzahl der bei der Optimierung eingefügten Knoten ausgegeben. Die Optimierung wurde mit einer Elternzahl von zwei durchgeführt. Die Tabelle A.11 zeigt das Ergebnis der Untersuchung des Einflusses der Elternzahl auf die TCS. Es ist von jedem Versuch die maximale Zahl der Eltern,

¹Bei den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Berechnung mit größeren TCS auf einem PC teilweise deutlich länger als 30s dauert oder teilweise auch gar nicht möglich ist.

ECUs	Bauteile	DTCs	Wirkketten	TCS ohne Optimierung	zusätzliche Knoten	TCS nach Optimierung	RAM in MB
17	1104	305	311	$4,611 \cdot 10^{18}$	1069	14520	134
18	1266	412	343	$4,612 \cdot 10^{18}$	1187	16766	175
20	1207	350	339	$4,611 \cdot 10^{18}$	1176	15952	160
19	1290	574	356	$7,379 \cdot 10^{19}$	1309	17692	222
52	1423	472	399	$1,934 \cdot 10^{25}$	1331	18948	262

Tabelle A.10.: Größe ausgewählter Netze

max. Eltern	2 Eltern	3 Eltern	4 Eltern	5 Eltern	6 bis 10 Eltern	TCS
2	1510	0	0	0	0	15952
3	734	388	0	0	0	15952
4	707	91	207	0	0	17608
5	679	91	55	121	0	20264
10	664	74	50	38	57	63936

Tabelle A.11.: Einfluss der maximalen Zahl von Elternknoten auf die TCS eines Netzes

die Menge der Knoten mit einer bestimmten Zahl von Eltern sowie die TCS des Netzes angegeben.

Bewertung:

Bestanden

In der Tabelle A.10 ist zu erkennen, dass die TCS durch die Optimierung für alle fünf Fahrzeuge einen Wert kleiner 10^6 hat. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Beobachtungen aus Abschnitt 7.5, wo mehrere hundert Netze automatisch generiert und berechnet wurden.

In der Tabelle A.11 ist zu erkennen, dass die TCS bei zwei und bei drei Eltern gleich groß ist. Bei Werten größer drei nimmt die TCS deutlich zu. Dies entspricht dem im Abschnitt 4.4.2 und Abbildung 4.10 beschriebenen Verhalten und lässt sich mit allen untersuchten Netzen reproduzieren. Die maximale Elternzahl wird bei den durchgeführten Versuchen nur bei der Generierung von Vermittlungsknoten (vgl. Abschnitt 4.4.3) berücksichtigt. Dadurch gab es in allen Versuchen die gleiche Zahl von Logikknoten, lediglich die Zahl der Vermittlungsknoten variiert. Dies ist auch die Ursache für die hohe Zahl der Knoten mit zwei Eltern.

Die Untersuchung wurde mit Netzen von zehn verschiedenen Fahrzeugen wiederholt. Die Ergebnisse führen jedoch immer zu der gleichen Aussage. Bei den Untersuchungen wurde außerdem beobachtet, ob die berechneten Fehlerwahrscheinlichkeiten unabhängig von der Anzahl der Elternknoten die Gleichen sind. Dafür wurden die Fehlerkandidatenlisten beim jeweils gleichen Fehlersymptom (DTC 1519) verglichen. Es wurden lediglich Rundungsfehler im Bereich $< 10^{-6}$ entdeckt. Diese entstehen durch die unterschiedliche Zahl an Fließkommaoperationen, die zur Berechnung des Netzes notwendig sind. Bei scheinbar gleichstark gewichteten Fehlerkandidaten ist es dadurch teilweise zu einer Vertauschung der Reihenfolge in der Fehlerkandidatenliste gekommen. Da die Reihenfolge bei gleichstark gewichteten Fehlerkandidaten quasi zufällig ist, stellt dieser Effekt keine Beeinträchtigung dar.

A.1.7 Performance

Beschreibung: Die Einhaltung der geforderten Zeiten ist notwendig, um ein flüssiges Arbeiten mit dem System zu gewährleisten. Die Ermittlung der initialen Liste kann länger dauern, da die Generierung des Bayes-Netzes bereits durchgeführt werden kann, während die Fehlersymptome abgefragt bzw. aus dem Fahrzeug ausgelesen werden. Um die notwendigen Zeiten zu ermitteln, wurde die Software dahingegen erweitert, dass sie die Zeiten für die einzelnen Berechnungsschritte mit einer Auflösung von 1 ms messen und ausgeben kann.

Erwartung: Da bereits beim Entwurf der wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung auf die Performance des zukünftigen Systems geachtet wurde, sollte es möglich sein, die geforderten Zeitvorgaben auch bei komplexen Fahrzeugstrukturen einzuhalten.

Ergebnis: In der Tabelle A.12 sind die gemessenen Laufzeiten für die einzelnen Berechnungsstufen der wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung dargestellt. Die Werte sind

Berechnungsschritt	Benötigte Zeit
Generierung Bayes-Netz (unoptimiert)	0,203 s
Logisches Zusammenfassen der Knoten	1,770 s
Einfügen von virtuellen Knoten	0,047 s
Befüllen der Wahrscheinlichkeitstabellen	1,096 s
Kompilieren des Netzes	2,178 s
Propagierung aller Symptome	1.450 s
Aktualisierung der Fehlerkandidaten	0.350 s
Summe:	7,094 s

Tabelle A.12.: Laufzeit der Berechnungsschritte

Mittelwerte aus 10 Versuchen mit jeweils unterschiedlichen Strukturdaten. Die Messungen wurden auf einem Laptop mit einen 2GHz Intel Core2Duo Prozessor und 1GB RAM unter Microsoft Windows (32Bit) durchgeführt.

Bewertung:

Bestanden

Die Generierung des unoptimierten Netzes (im Schnitt 1800 Knoten) aus den Strukturdaten stellt keine hohe Anforderung an die Rechnerleistung dar und ist dementsprechend schnell. Für das logische Zusammenfassen ist deutlich mehr Rechenaufwand notwendig (vgl. Abschnitt 4.4.3). Das Einfügen virtueller Knoten ist hingegen einfach. Das Füllen der Wahrscheinlichkeitstabellen nimmt vor allen auf Grund der Menge der berechneten Zahlen verhältnismäßig viel Zeit in Anspruch. Beim Kompilieren des Netzes wird dieses mit allen notwendigen Datenstrukturen im Hauptspeicher des Computers angelegt, so dass die nachfolgenden Berechnungen möglichst effizient durchgeführt werden können. Dieser Vorgang benötigte mit durchschnittlich über 2 sec. die meiste Zeit. Zusammen mit dem Propagieren aller Symptome im Netz wurden für alle genannten Schritte zusammen 6,744 sec. benötigt. Dieser Wert liegt deutlich unter den geforderten 30 sec. Die reine Generierung des Netzes (ohne Kompilierung und Propagierung) benötigte 3,116 sec. und kann damit als sehr schnell angesehen werden.

Die Propagierung des Fehlerzustands aller Symptomknoten im Netz benötigte mit 1,54 sec. deutlich weniger Zeit als die geforderten 5 sec. für die Berechnung der Fehlerkandidatenliste. Bei der Aktualisierung der Fehlerkandidaten auf Grund einer neuen Information muss nur ein Teil des Netzes neu berechnet werden, was den Wert für die benötigte Zeit noch einmal wesentlich verringert.

A.2 Test der Prüfgeneratoren

In diesem Abschnitt werden die im Kapitel 5 entwickelten Verfahren zur individuellen Generierung von Prüfschritten untersucht. Dabei soll gezeigt werden, dass die Anforderungen, die aus den in Kapitel 3 identifizierten Probleme abgeleitet wurden, durch das entstandene System erfüllt werden. Die Tabelle 5.3 auf Seite 80 stellt den Zusammenhang zwischen den einzelnen Anforderungen und den Testfällen in diesem Abschnitt dar.

A.2.1 Test der Grundfunktion

Zu untersuchende Eigenschaften: Es soll das Verhalten des Prüfgenerators bei der Generierung von Durchgangsprüfungen zur Überprüfung eines oder mehrerer elektrischer Bauteile untersucht werden. Die einzelnen Prüfschritte sollen dem Anwender in Form von Bildschirmdialogen, die Prüfanweisungen und eventuell Zusatzinformationen enthalten, angezeigt werden. Die Prüfungen müssen zu den vorgegebenen elektrischen Strukturdaten passen und bezüglich der zu überprüfenden Komponenten sinnvoll sein.

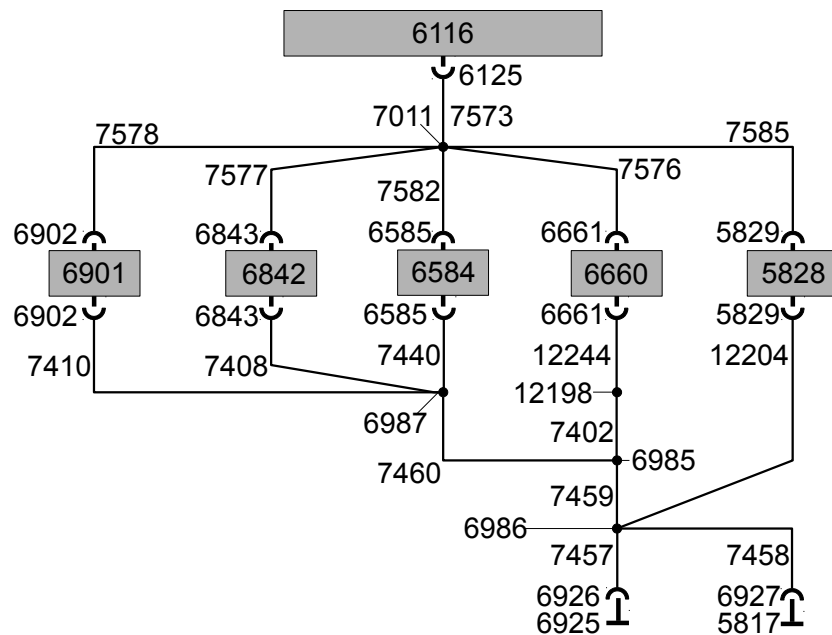


Abbildung A.2.: Schalterbeleuchtung der Amaturentafel (Ausschnitt aus Stromlaufplan)

Szenario: In das Diagnosesystem wird der Strukturdatensatz eines realen VW Golf aus dem Jahr 2006 geladen. Die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung wird deaktiviert. Über die Benutzeroberfläche wird zuerst jeweils ein Fehlerkandidat, im Anschluss daran mehrere Kandidaten gleichzeitig in das Diagnosesystem eingegeben. Das System soll daraufhin Prüfanweisungen generieren.

Beschreibung: Der Ausschnitt aus dem Stromlaufplan in Abbildung A.2 betrifft die Schalterbeleuchtung der Schalttafel. Die Ansteuerung der Schalterbeleuchtung erfolgt über das Bordnetzsteuergerät (oberer Teil der Abbildung). An dessen Ausgang sind über einen Splice fünf beleuchtete Schalter² (Mitte) angeschlossen. Der untere Teil der Abbildung (Verbindung zur Fahrzeugmasse) ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht relevant. Der Prüfgenerator soll Prüfungen für den Splice (7011) sowie die sechs Leitungen (7573, 7578, 7577, 7582, 7576 und 7585) generieren. Im ersten Schritt wird dem Prüfgenerator nur jeweils ein Fehlerkandidat übergeben und das Ergebnis notiert. Im zweiten Schritt werden alle Fehlerkandidaten gleichzeitig übergeben.

Erwartung: Der Prüfgenerator sollte 15 Prüfungen für den Splice und jeweils 5 Prüfungen für die Leitungen generieren. Die Prüfungen sollen in verständlicher Form ausgegeben werden. Es soll jeweils die korrekte Menge der überprüften Bauteile ermittelt werden.

Ergebnis: Die Ergebnisse der Prüfschritte sind in der Tabelle A.13 dargestellt. Für den Splice (7011) wurden 15 Prüfungen generiert. Jede Zeile stellt eine Prüfung dar. Die Prüfungen der Leitungen sind jeweils Teilmengen der Prüfungen für den Splice. Wenn dem Prüfgenerator lediglich die Leitung 7573 übergeben wird, werden nur die Prüfungen 1 bis 5 generiert. In der Tabelle ist dies durch Kreuze in der Spalte 7573 dargestellt. Werden dem Prüfgenerator alle 7 Fehlerkandidaten gemeinsam übergeben, werden die gleichen 15 Prüfungen generiert.

Die Abbildung A.3 stellt exemplarisch eine vom System generierte Prüfanweisung dar. Die interne Bezeichnung der Prüfung ist oberhalb der Prüfanweisung auf der rechten Seite angegeben. Die Prüfung entspricht der Zeile 3 in Tabelle A.13. Es wurde das Template für eine Durchgangsprüfung

²es sind jeweils nur die Anschlüsse für die Beleuchtung dargestellt

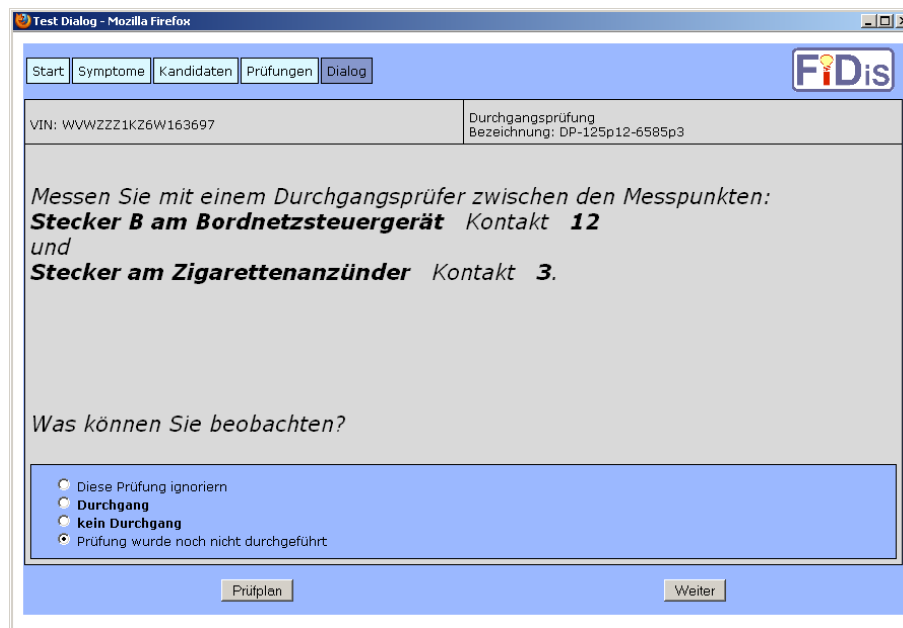


Abbildung A.3.: Ausgabe einer Prüfanweisung (Durchgangsprüfung)

verwendet. In das Template werden zur Laufzeit die Bezeichnungen der beiden Messpunkte eingesetzt. Da es sich bei beiden Messpunkten um Stecker handelt, besteht die Bezeichnung jeweils aus der Bezeichnung des Steckers sowie der Nummer des Kontakts im Steckergehäuse. Die deutsche Bezeichnung des Steckers 6125 ist „Stecker B am Bordnetzsteuergerät“. Die Bezeichnung von Stecker 6585 ist „Stecker am Zigarettenanzünder“. Abbildungen zu den Steckern waren nicht hinterlegt und werden demnach auch nicht angezeigt.

Bewertung:

Bestanden

Der Prüfgenerator hat für die gegebenen Fehlerkandidaten jeweils eine vollständige und korrekte Menge von Durchgangsprüfungen generiert und ausgegeben. Die Menge der dabei überprüften Komponenten ist jeweils korrekt. Die generierte Prüfanweisung in Abbildung A.3 ist verständlich.

A.2.2 Signalprüfungen

Zu untersuchende Eigenschaften: Es soll das Verhalten des Prüfgenerators für Signalprüfungen getestet werden. Der Prüfgenerator kann für folgende Prüfungen verwendet werden:

- Überprüfung der Spannungsversorgung eines Bauteils
- Überprüfung von Masseverbindungen
- Überprüfung von Signalleitungen, wenn die Signale mit Werkstattmitteln messbar sind

Die meisten Signale gehen von genau einer Quelle aus. In diesen Fällen gibt es von den Messpunkten aus einen eindeutigen Pfad zur jeweiligen Signalquelle. Im Abschnitt 5.4.3 wurde gezeigt, dass es vor allem bei den Masseverbindungen Ausnahmen gibt. In Abbildung A.2 ist eine solche Situation mit zwei Massepunkten in einem Massezweig dargestellt. Es soll die korrekte Funktionsweise des Prüfgenerators sowohl für einfache Signalprüfungen als auch für Masseprüfungen getestet werden.

Szenario: Dem Diagnosesystem wird der gleiche Struktur-Datensatz wie in Abschnitt A.2.1 zusammen mit einer Datei mit Signalbeschreibungen übergeben. Die Datei enthält u. a. die Information, dass alle Bauteile vom Typ Massepunkt das Signal *GND* führen, welches mittels einer

#	70 11	75 73	75 78	75 77	75 82	75 76	75 85	MP1	MP2	Gepriüfte Komponenten
1	×	×	×					6125p12	6902p8	{6125, 7573, 7011, 7578, 6902}
2	×	×		×				6125p12	6843p10	{6125, 7573, 7011, 7577, 6843}
3	×	×			×			6125p12	6585p3	{6125, 7573, 7011, 7582, 6585}
4	×	×				×		6125p12	6661p1	{6125, 7573, 7011, 7576, 6661}
5	×	×					×	6125p12	5829p12	{6125, 7573, 7011, 7585, 5829}
6	×		×	×				6902p8	6843p10	{6902, 7578, 7011, 7577, 6843}
7	×		×		×			6902p8	6585p3	{6902, 7578, 7011, 7582, 6585}
8	×		×			×		6902p8	6661p1	{6902, 7578, 7011, 7576, 6661}
9	×		×				×	6902p8	5829p3	{6902, 7578, 7011, 7585, 5829}
10	×			×	×			6843p10	6585p3	{6843, 7577, 7011, 7582, 6585}
11	×			×		×		6843p10	6661p1	{6843, 7577, 7011, 7576, 6661}
12	×			×			×	6843p10	5829p3	{6843, 7577, 7011, 7585, 5829}
13	×				×	×		6585p3	6661p1	{6585, 7582, 7011, 7576, 6661}
14	×				×		×	6585p3	5829p3	{6585, 7582, 7011, 7585, 5829}
15	×					×	×	6661p1	5829p3	{6661, 7576, 7011, 7585, 5829}

Tabelle A.13.: Generierte Durchgangsprüfungen mit Angabe der Messpunkte und der geprüften Komponenten

Masseprüfung nachgewiesen werden kann. Des Weiteren ist bekannt, dass der Anschluss 6125 am Steuergerät 6116 (vgl. Abbildung A.2) das Signal *Instrumentenbeleuchtung* mit der Beschreibung *Gleichspannung 5V...12V* führt.

Beschreibung: Dem System wird im ersten Schritt die Leitung 7573 zur Generierung von Spannungsprüfungen übergeben. Im zweiten Schritt werden die Leitungen 7458 und 7459 zur Generierung von Masseprüfungen übergeben. Es werden lediglich die vom Prüfgenerator für Signalprüfungen bzw. Masseprüfungen generierten Prüfungen betrachtet.

Erwartung: Im ersten Schritt sollte der Prüfgenerator 5 Prüfungen erzeugen, bei denen die Spannung jeweils am oberen Anschluss (Abbildung A.2) der beleuchteten Bedienelemente gemessen wird. Der Prüfgenerator sollte zu jeder Prüfung den überprüften Pfad (von der Signalquelle bis zum Messpunkt) ausgeben. Im zweiten Schritt sollten für die Leitung 7459 vier Prüfungen generiert werden. Die Prüfung darf entlang des Pfades nur jeweils vom Messpunkt bis zum Splice 6986, jedoch nicht bis zum Massepunkt erfolgen, da der Signalpfad sonst nicht mehr eindeutig wäre. Für die Leitung 7458 darf keine Prüfung generiert werden, da die Suche nach möglichen Messpunkten bereits am Splice 6986 abbrechen muss.

Ergebnis: Die generierten Spannungsprüfungen sind in Tabelle A.14 dargestellt. Tabelle A.15 enthält die generierten Masseprüfungen.

#	Signal	Messpunkt	Gepriüfte Komponenten
1	Instrumentenbel. (5V bis 12V)	6902 Pin 8	{6125, 7573, 7011, 7578, 6902}
2	Instrumentenbel. (5V bis 12V)	6843 Pin 10	{6125, 7573, 7011, 7577, 6843}
3	Instrumentenbel. (5V bis 12V)	6585 Pin 3	{6125, 7573, 7011, 7582, 6585}
4	Instrumentenbel. (5V bis 12V)	6661 Pin 1	{6125, 7573, 7011, 7576, 6661}
5	Instrumentenbel. (5V bis 12V)	8529 Pin 3	{6125, 7573, 7011, 7585, 5829}

Tabelle A.14.: Generierte Signalprüfungen für die Leitung 7573 (vgl. Abbildung A.2)

#	Signal	Messpunkt	Geprüfte Komponenten
Leitung 7459			
1	GND	6902 Pin 3	{6902, 7410, 6987, 7460, 6985, 7459, 6986}
2	GND	6843 Pin 6	{6843, 7408, 6987, 7460, 6985, 7459, 6986}
3	GND	6585 Pin 6	{6585, 7440, 6987, 7460, 6985, 7459, 6986}
4	GND	6661 Pin 4	{6661, 12244, 12198, 7402, 6985, 7459, 6986}
Leitung 7458			
-	-	-	{ }

Tabelle A.15.: Generierte Masseprüfungen für die Leitungen 7458 und 7459 (vgl. Abbildung A.2)

Bewertung:

Bestanden

Der Prüfgenerator hat die Strukturdaten sowie die Signalbeschreibungen richtig interpretiert und die erwarteten Prüfungen generiert. Die Menge der überprüften Komponenten ist jeweils korrekt.

A.2.3 Komplexes Fehlerbild

Zu untersuchende Eigenschaften: Bei komplexen Strukturen mit vielen möglichen Messpunkten sollen nicht alle erdenklich möglichen Messungen generiert werden, sondern lediglich eine sinnvolle, begrenzte Anzahl. Im Abschnitt 5.3 wurde beschrieben, dass Messpunkte, die nah am zu prüfenden Bauteil sind (durch einen kurzen elektrischen Pfad) sinnvoller sind, als Messpunkte, die weiter entfernt sind. Es soll untersucht werden, ob bei einer Begrenzung der maximalen Anzahl von Prüfungen die Messpunkte in der Nähe des zu prüfenden Bauteils weiterhin berücksichtigt werden.

Bei einem Bordnetz, das aus mehreren Leitungssträngen besteht, muss beim Messen an aufgetrennten Koppelstellen sichergestellt werden, dass an der richtigen Seite der Trennstelle gemessen wird.

Szenario: Die Untersuchungen werden anhand der Bordnetzkomponenten zur Ansteuerung des Rückfahrscheinwerfers im Golf V (vgl. Abschnitt A.1.1) durchgeführt. Die Abbildung A.1 auf Seite 140 zeigt den betreffenden Stromlaufplan. Im Abschnitt A.1.1 wurden mögliche Fehlerkandidaten ermittelt (vgl. Tabelle A.1). Diese werden im Folgenden als Eingangsgröße für die Prüfgeneratoren verwendet³.

Beschreibung: Im ersten Schritt wird die maximale Anzahl zu generierender Prüfungen auf zehn begrenzt. Im zweiten Schritt werden nur Prüfungen für den Splice 7055 generiert, wobei die Anzahl der Prüfungen pro Prüfgenerator auf drei beschränkt wird.

Erwartung: Das System sollte im ersten Schritt von jeder Prüfungsart bis zu zehn Prüfungen generieren. Im zweiten Schritt dürfen jeweils maximal drei Durchgangs- und Spannungsmessungen generiert werden. Bei Messungen an Koppelsteckern soll jeweils an der richtigen Seite gemessen werden.

Ergebnis: Die Tabelle A.16 zeigt die im ersten Schritt generierten Prüfungen für das beschriebene Szenario. In der Tabelle A.17 ist zu jeder Prüfung die Menge der geprüften Komponenten angegeben. Die Ergebnisse des zweiten Schrittes sind eine Teilmenge der Ergebnisse des ersten Schrittes und in den Tabellen **fett** hervorgehoben.

³Es werden alle Fehlerkandidaten, d. h. nicht nur die in der Tabelle A.1 dargestellten verwendet.

#	Prüfung	Beschreibung
1	DP-6125p1–5884p5	DP Stecker B am BSG Pin 1 → Stecker Heckklappe_1a Pin 5
2	DP-6125p1–6841p3	DP Stecker B am BSG Pin 1 → Stecker Innenspiegel Pin 3
3	DP-6125p1–2766p1	DP Stecker B am BSG Pin 1 → Stecker Lampe Rückfahrlicht Pin1
4	DP-6841p3–5884p5	DP Stecker Innenspiegel Pin 3 → Stecker Heckklappe_1a Pin 5
5	DP-6841p3–2766p1	DP Stecker Innenspiegel Pin 3 → Stecker Lampe Rückfahrlicht Pin1
6	DP-2773p5–2766p1	DP Stecker Heckklappe_1b Pin 5 → Stecker Lampe Rückfahrlicht Pin1
7	DP-2766p2–2771p1	DP Stecker Lampe Rückfahrlicht Pin2 → Stecker Heckklappe_2b Pin 1
8	DP-2766p2–6917	DP Stecker Lampe Rückfahrlicht Pin2 → Kabelschuh am Massepunkt AHK
9	DP-5882p1–6917	DP Stecker Heckklappe_2a Pin 1 → Kabelschuh am Massepunkt AHK
10	SM-6113p1	SM am BSG Kontakt B1
11	SM-5884p5	SM am Stecker Heckklappe_1a Pin 5
12	SM-2766p1	SM am Stecker Lampe Rückfahrlicht Pin1
13	SM-6841p3	SM am Stecker Innenspiegel Pin 3
14	MP-2766p2	MP am Stecker Lampe Rückfahrlicht Pin2
15	MP-5882p1	MP am Stecker Heckklappe_2a Pin 1
16	KP-5884-2773	Prüfung Stecker Heckklappe_1
17	KP-2771-5882	Prüfung Stecker Heckklappe_2
18	KP-2765	Prüfung Lampe für Rückfahrlicht
19	KP-6840	Prüfung Innenspiegel
20	KP-6113	Prüfung Bordnetzsteuergerät

Tabelle A.16.: Generierte Prüfungen für Testfall A.2.3

#	Prüfung	Geprüfte Komponenten
1	DP-6125p1–5884p5	{6125p1, 8078, 7055, 8081, 5884p5}
2	DP-6125p1–6841p3	{6125p1, 8078, 7055, 8076, 6841p3}
3	DP-6125p1–2766p1	{6125p1, 8078, 7055, 8081, 5884p5, 2773p5, 2805, 2766p1}
4	DP-6841p3–5884p5	{6841p3, 8076, 7055, 8081, 5884p5}
5	DP-6841p3–2766p1	{6841p3, 8076, 7055, 8081, 5884p5, 2773p5, 2805, 2766p1}
6	DP-2773p5–2766p1	{2773p5, 2805, 2766p1}
7	DP-2766p2–2771p1	{2771p1, 2791, 2785, 2790, 2766p2}
8	DP-2766p2–6917	{6917, 7462, 6988, 7461, 5882p1, 2771p1, 2791, 2785, 2790, 2766p2}
9	DP-5882p1–6917	{6917, 7462, 6988, 7461, 5882p1}
10	SM-6113p1	{6113p1}
11	SM-5884p5	{6113p1, 6125p1, 8078, 7055, 8081, 5884p5}
12	SM-2766p1	{6113p1, 6125p1, 8078, 7055, 8081, 5884p5, 2773p5, 2805, 2766p1}
13	SM-6841p3	{6113p1, 6125p1, 8078, 7055, 8076, 6841p3}
14	MP-2766p2	{6915, 6917, 7462, 6988, 7461, 5882p1, 2771p1, 2791, 2785, 2790, 2766p2}
15	MP-5882p1	{6915, 6917, 7462, 6988, 7461, 5882p1}
16	KP-5884-2773	{5884, 2773}
17	KP-2771-5882	{2771, 5882}
18	KP-2765	{2765}
19	KP-6840	{6840}
20	KP-6113	{6113}

Tabelle A.17.: Geprüfte Komponenten der Prüfungen aus Tabelle A.16

Bewertung:

Bestanden

Die generierten Prüfungen lassen sich allesamt mit Hilfe der Abbildung A.1 sowie der Tabelle A.17 plausibilisieren. Das untersuchte System enthält zwei Koppelstecker. Die Messungen bei aufgetrenntem Stecker (Zeilen 1, 4, 6, 7, 9, 11, 14) sind jeweils korrekt. Die Prüfung *SM-6113p1* setzt voraus, dass ein Stecker vom BSG abgezogen werden muss. In diesem Fall besteht die Gefahr, dass das Steuergerät nicht mehr wie erwartet funktioniert. Wie im Abschnitt 5.4.2 beschrieben, sind für jedes zu messende Ausgangssignal bestimmte Abhängigkeiten von Eingangssignalen definiert. Für den beschriebenen Fall muss die Spannungsversorgung sowie der CAN am Steuergerät angeschlossen sein. Im konkreten Beispiel erfolgt beides nicht über den Stecker B. Dadurch ist die Prüfung *SM-6113p1* zulässig. Die Suche nach möglichen Messpunkten für Durchgangs- und Signalprüfungen erfolgt nach dem Prinzip der Breitensuche (vgl. Abschnitt 5.3). Bei einer Begrenzung der zu generierenden Prüfungen auf drei werden die Durchgangsprüfungen *DP-6125p1-5884p5*, *DP-6125p1-6841p3*, *DP-6841p3-5884p5* generiert. Die Messpunkte sind jeweils nur einen Leitungsabschnitt vom zu prüfenden Splice 7055 entfernt. Die Entfernung zu allen anderen Messpunkten (z. B. bei Prüfung *DP-6125p1-2766p1*) ist größer.

A.2.4 Einfluss der Signaldefinitionen

Signalprüfungen, wie die Überprüfung der Spannungsversorgung oder andere einfach zu überprüfender Signale, sind eine sinnvolle Ergänzung zu Durchgangsprüfungen. Dadurch, dass durch diese Art von Prüfungen nicht nur das Bordnetz auf Unterbrechungen hin überprüft werden kann, sondern auch komplexe Bauteile (Signalquellen z.B. Batterie, Generator, Steuergeräte, Relais oder Schalter), lässt sich eine höhere Prüfabdeckung gegenüber reinen Leistungsprüfungen (Durchgangsprüfungen) erreichen. Darüber hinaus ist der Aufwand einer Spannungsmessung im Vergleich zu einer Durchgangsprüfung wesentlich geringer, da nur ein Messpunkt freigelegt werden muss.

Zu untersuchende Eigenschaften: Da es nicht sinnvoll erscheint, die Signale jedes einzelnen Messpunktes im Fahrzeug zu beschreiben und vom Mechaniker nachmessen zu lassen, werden nur bestimmte einfach zu überprüfende Signale für entsprechende Prüfungen spezifiziert. Es soll untersucht werden, wie viele zusätzliche Signalprüfungen automatisch generiert werden können, wenn dem Diagnosesystem eine bestimmte Zahl typischer Signaldefinitionen bekannt ist.

Szenario: Dem Diagnosesystem wird der gleiche Struktur-Datensatz wie in Abschnitt A.2.1 zusammen mit einer Datei mit Signalbeschreibungen übergeben.

Beschreibung: Aus der Datei mit den Signalbeschreibungen werden schrittweise Einträge entfernt. Nach dem Propagieren der Signale innerhalb der elektrischen Strukturdaten wird untersucht, an wie vielen Messpunkten entsprechende Signale angetragen sind. Wenn an einem Messpunkt ein Signal angetragen ist, kann an diesem Messpunkt eine Signalprüfungen (Spannungsmessungen oder Masseprüfungen) durchgeführt werden. Andernfalls sind lediglich Durchgangsprüfungen von diesem Messpunkt aus möglich.

Erwartung: Es ist zu erwarten, dass allein durch das Propagieren des Signals GND (Fahrzeugmasse) sehr viele Prüfungen möglich werden, da fast alle Stecker mindestens einen Massekontakt enthalten. Als Signalquelle für die Spannungsversorgung wird wie in Abbildung 5.4 auf Seite 70 der Abgang von Sicherungen verwendet. Es ist zu erwarten, dass sich die Anzahl der Prüfungen durch die Berücksichtigung der Spannungsversorgung nochmals deutlich erhöht. Die Beleuchtungseinrichtungen am und im Fahrzeug machen ebenfalls einen signifikanten Teil der Fahrzeugelektrik aus. Die dazugehörigen Signale (Licht an, Licht aus) lassen sich noch dazu

Masse	Sicherungen	CAN	Beleuchtung	Anzahl der Signale	Anzahl möglicher Signalprüfungen	Abdeckung
×	52	10	26	89	312	35,82%
×	52	10	0	63	259	29,74%
×	52	0	0	53	191	21,93%
×	5	10	26	42	226	25,95%
×	5	10	0	16	170	19,52%
×	5	0	0	6	102	11,71%
×	0	0	0	1	94	10,79%
	0	0	0	0	0	0%

Tabelle A.18.: Einfluss der Anzahl von Signalen auf die Anzahl möglicher Signalprüfungen

einfach mittels einer Spannungsmessung überprüfen. Die physikalischen Eigenschaften der Datenbusse lassen sich ebenfalls mit geringen Aufwand mit einem Oszilloskop oder einem besseren Multimeter überprüfen. Da der CAN-Bus beim untersuchten Fahrzeug an allen Steuergeräten angeschlossen ist, werden dadurch weitere Signalprüfungen möglich.

Ergebnis: In der Tabelle A.18 sind die Ergebnisse der einzelnen Schritte der Untersuchung zusammengefasst. Die erste Zeile der Tabelle stellt den initialen Zustand der Datei mit den Signalbeschreibungen dar. Mit den 89 beschriebenen Signalen, können knapp 36% aller Bordnetzkomponenten des untersuchten Fahrzeugs durch Signalprüfungen überprüft werden. Im dritten Schritt werden nur noch die Spannungsversorgungen (GND und Sicherungsabgänge) für Signalprüfungen berücksichtigt. Nur mit diesen zwei Arten von Signalen können mit 191 Messungen fast 22% des Bordnetzes überprüft werden. Selbst wenn, wie in Zeile 7 angegeben, nur das Massesignal propagiert wird, sind noch über 10% Abdeckung möglich.

Bewertung:

Bestanden

Signalprüfungen vor allem Versorgungsspannungs- und Masseprüfungen können den Aufwand zur Überprüfung von Bordnetzkomponenten erheblich reduzieren. Die Untersuchung hat gezeigt, dass auch mit vergleichsweise wenigen Signaldefinitionen eine hohe Abdeckung des Bordnetzes erreicht werden kann.

A.3 Test des Prüfablaufs

In diesem Abschnitt werden die im Kapitel 6 entwickelten Verfahren untersucht. Dabei soll gezeigt werden, dass die Anforderungen, die aus den in Kapitel 3 identifizierten Probleme abgeleitet wurden, durch das entwickelte System erfüllt werden. Die Tabelle 6.1 auf Seite 98 stellt den Zusammenhang zwischen den einzelnen Anforderungen und den Testfällen in diesem Abschnitt dar.

A.3.1 Gewichtung der Prüfungen

Zu untersuchende Eigenschaften: Die Gewichtung der zur Verfügung stehenden Prüfungen ist notwendig, um in der aktuellen Situation die sinnvollste auszuwählen. Im Kapitel 6 wurden insgesamt vier Verfahren zur Gewichtung von Prüfungen beschrieben:

1. zu erwartender Aufwand bei der Durchführung einer Prüfung
2. kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit aller durch eine Prüfung geprüften Komponenten
3. zu erwartender Informationsgewinn bezüglich der möglichen Fehlerkandidaten
4. Effektivität als Quotient aus Informationsgewinn und Aufwand

Anhand eines konkreten Beispiels sollen die Verfahren auf eine feste Anzahl generierter Prüfungen angewendet werden. Die dabei entstehenden Gewichtungen sowie deren Auswirkungen sollen untersucht werden.

Szenario: Es wird ein reales Fehlerszenario verwendet, dass bereits für die Tests der Fehlerkandidatenermittlung im Abschnitt A.1.1 als auch für einen Test der Prüfgeneratoren im Abschnitt A.2.3 verwendet wurde. Im Bordnetzsteuergerät ist der DTC 1519 abgelegt, was auf einen Defekt des Rückfahrscheinwerfers hindeutet.

Ausgehend vom Fehlersymptom DTC 1519 hat die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung eine initiale Liste mit Fehlerkandidaten erstellt. Die zehn wahrscheinlichsten Fehlerkandidaten sind in Tabelle A.1 auf Seite 141 dargestellt. Ausgehend von der Fehlerkandidatenliste wurden von den Prüfgeneratoren verschiedene Prüfungen generiert. Die Tabelle A.16 auf Seite 155 enthält alle generierten Prüfungen.

Teilprüfung 1: Aufwand

Beschreibung: Zu einer der wichtigsten Größen für eine Gewichtung der Prüfungen im Prüfplan gehört der zu erwartende Aufwand, der mit der Durchführung einer Prüfung verbunden ist. Der Aufwand wird üblicherweise in Zeiteinheiten wie Minuten oder hundertstel Stunden gemessen.

Dem Diagnosesystem steht ein Datensatz zur Verfügung, welcher die Aufwände für die Durchführung bestimmter Arbeitspositionen enthält (vgl. Abschnitt 6.3.1). Die Tabelle A.19 stellt exemplarisch einen für die kommenden Untersuchungen relevanten Ausschnitt aus diesem Datensatz dar. Der Aufwand, z.B. für das Freilegen eines Messpunktes, umfasst jeweils das Freilegen (auseinander bauen) sowie die Wiederherstellung des Ausgangszustands (zusammen bauen). Es wird davon ausgegangen, dass bisher noch keine Prüfung durchgeführt und demnach auch noch keiner der Fehlerkandidaten oder Messpunkte freigelegt wurde.

#	Arbeitsposition	Aufwand	#	Arbeitsposition	Aufwand
1	Spannungsmessung	3 min	7	Stecker B am BSG freilegen	15 min
2	Masseprüfung	3 min	8	Stecker Innenspiegel freilegen	10 min
3	Durchgangsprüfung	6 min	9	Koppelstecker Heckklappe 1 freilegen	5 min
4	Lampen- / Steckerprüfung	3 min	10	Koppelstecker Heckklappe 2 freilegen	5 min
5	Prüfung Innenspiegel	20 min	11	Massepunkt Anhängerkupplung freilegen	8 min
6	Prüfung BSG	45 min	12	Lampenträger ausbauen	3 min

Tabelle A.19.: Aufwand einzelner Arbeitspositionen für die im Test A.3.1 untersuchten Prüfungen (Expertenwissen)

Erwartung: Das System soll den zu erwartenden Aufwand für jede im Abschnitt A.2.3 generierte Prüfung ermitteln. Dafür sollen die in Tabelle A.19 dargestellten Aufwände für die Arbeitspositionen verwendet werden. Des Weiteren soll ein Ranking der Prüfungen anhand des Aufwandes (Prüfung mit geringstem Aufwand an erster Stelle) erfolgen. Möglicherweise werden dadurch Prüfungen priorisiert, die zwar mit geringen Aufwand verbunden sind, jedoch nur minimal zu Fehlersuche beitragen.

Ergebnis: Die Tabelle A.20 enthält die vom System ermittelten zu erwartenden Aufwände für die Durchführung der Prüfungen. Die verbale Beschreibung der einzelnen Prüfungen kann Tabelle

# ^a	Prüfung	AP	C(PZ)
Durchgangsprüfungen			
17	DP 6125p1–5884p5	7;9;3	26 min
19	DP 6125p1–2766p1	7;8;3	31 min
16	DP 6125p1–6841p3	7;12;3	24 min
15	DP 6841p3–5884p5	8;9;3	21 min
13	DP 6841p3–2766p1	8;12;3	19 min
9	DP 2773p5–2766p1	9;12;3	14 min
10	DP 2766p2–2771p1	12;10;3	14 min
11	DP 2766p2–6917	12;11;3	17 min
14	DP 5882p1–6917	10;11;3	19 min
Masseprüfung			
3	MP 2766p2	12;2	6 min
5	MP 5882p1	10;2	8 min

#	Prüfung	AP	C(PZ)
Spannungsmessung			
12	SM 6113p1	7;1	18 min
4	SM 5884p5	9;1	8 min
2	SM 2766p1	12;1	6 min
8	SM 6841p3	8;1	13 min
Komponentenprüfung			
6	KP 5884-2773	9;4	8 min
7	KP 2771-5882	10;4	8 min
1	KP 2765	12;4	6 min
18	KP 6840	8;5	30 min
20	KP 6113	7;6	60 min

^aRanking – #1 ist die „beste“ Prüfung und wird deshalb vom Diagnosesystem automatisch ausgewählt

Tabelle A.20.: Vom System ermittelte Aufwände einzelner Prüfschritte (Prüfungen wurden im Abschnitt A.2.3 beschrieben)

A.16 entnommen werden. Die Tabelle A.17 hilft, zusammen mit Abbildung A.1, nachzuvollziehen, welche Komponenten die jeweiligen Prüfungen überprüfen. Das Ranking der Prüfungen ist in der vierten Spalte dargestellt. Ein dynamischer Prüfplan, welcher dieses Verfahren verwendet, würde automatisch die Prüfung mit der Nummer 1 auswählen. In diesem Beispiel gibt es drei Prüfungen, welche einen Aufwand von 6 min erfordern. Welche der drei Prüfungen die Nummer 1 zugewiesen bekommt ist quasi zufällig⁴. In diesem Fall wurde die Prüfung *KP2765* (Prüfung Lampe für Rückfahrlicht) ausgewählt.

Teilprüfung 2: kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit und Informationsgewinn

Beschreibung: Auf Grund der von der wahrscheinlichkeitsbasierten Fehlerkandidatenermittlung berechneten Fehlerwahrscheinlichkeiten der einzelnen Bauteile, die von einer Prüfung abgedeckt werden, lässt sich die kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit als Gewichtsmaß für die Prüfung berechnen. Aus dieser wiederum lässt sich der Informationsgewinn ableiten. Diese beiden Kenngrößen sowie das Ranking werden auf Basis der Wahrscheinlichkeiten aus Tabelle A.1 für alle Prüfungen aus Tabelle A.16 berechnet.

Erwartung: Die kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit ist immer dann besonders hoch, wenn viele Komponenten bzw. Komponenten mit hoher Fehlerwahrscheinlichkeit geprüft werden. Da die Lampe die mit Abstand höchste Fehlerwahrscheinlichkeit hat, wird die dazugehörige Prüfung ebenfalls sehr hoch priorisiert.

Ergebnis: Die Ergebnisse sind in Tabelle A.21 dargestellt. Die Prüfung *KP2762* (Prüfung Lampe für Rückfahrlicht) hat mit 0,730 die höchste kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit. Da bei dieser Prüfung nur eine Komponente überprüft wird, entspricht dies der Fehlerwahrscheinlichkeit der Komponente. Die Entropie dieser Prüfung ist (obwohl die Wahrscheinlichkeit > 0,5 ist) ebenfalls die höchste von allen untersuchten Prüfungen. Dies liegt daran, dass 0,730 etwas näher bei 0,5 liegt als 0,262 von Prüfung *SM2766p1*. Da alle anderen Prüfungen eine Wahrscheinlichkeit kleiner 0,5 haben, ist die ermittelte Reihenfolge insgesamt für beide Verfahren gleich.

⁴Es hängt davon ab, in welcher Reihenfolge die Prüfungen generiert wurden und wie der Sortieralgorithmus implementiert ist.

#	Prüfung	$P(f_{ii})$	$H(f_{ii})$	#	Prüfung	$P(f_{ii})$	$H(f_{ii})$
Durchgangsprüfungen				Spannungsmessung			
10	DP 6125p1–5884p5	0,147	0,602	19	SM 6113p1	0,016	0,118
16	DP 6125p1–2766p1	0,106	0,488	8	SM 5884p5	0,161	0,637
4	DP 6125p1–6841p3	0,250	0,811	2	SM 2766p1	0,262	0,830
11	DP 6841p3–5884p5	0,147	0,602	13	SM 6841p3	0,121	0,532
5	DP 6841p3–2766p1	0,250	0,811	Komponentenprüfung			
14	DP 2773p5–2766p1	0,120	0,529	9	KP 5884-2773	0,152	0,615
17	DP 2766p2–2771p1	0,106	0,488	18	KP 2771-5882	0,069	0,362
6	DP 2766p2–6917	0,216	0,753	1	KP 2765	0,730	0,841
12	DP 5882p1–6917	0,122	0,535	15	KP 6840	0,118	0,524
Masseprüfung				20	KP 6113	0,016	0,118
3	MP 2766p2	0,256	0,821				
7	MP 5882p1	0,168	0,653				

Tabelle A.21.: Ermittelte kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit sowie Entropie und darauf beruhendes Ranking der Prüfungen

Teilprüfung 3: Effektivität

Beschreibung: Die Effektivität gemäß Formel (6.7) ist eine wichtige Bewertungsgröße für die zweistufige Prüfstrategie aus Abschnitt 6.4. Analog zu den beiden vorherigen Teilprüfungen wird die Effektivität gemäß Formel (6.7) für alle Prüfungen berechnet. Anschließend erfolgt ein Ranking, wobei die Prüfung mit der höchsten Effektivität an erster Stelle steht.

Erwartung: Dieses Gewichtungsverfahren soll die Nachteile der beiden zuvor beschriebenen Verfahren kompensieren. Eine Gewichtung, welche ausschließlich den Aufwand berücksichtigt, priorisiert u.U. Prüfungen, die nur zu einem geringen Teil zur Fehlersuche beitragen können. Bei einer Auswahl anhand des Informationsgewinns werden u.U. Prüfungen priorisiert, welche mit einem sehr hohen Aufwand verbunden sind. Bei einer Gewichtung nach Formel (6.7) führen beide Extreme zu einer geringen Gewichtung.

Da die Prüfung *KP2762* (Prüfung Lampe für Rückfahrlicht) sowohl zum höchsten Informationsgewinn führt als auch mit dem geringsten Aufwand verbunden ist, wird erwartet, dass die Effektivität dieser Prüfung ebenfalls am höchsten ist.

Ergebnis: Die berechneten Effektivitäten sowie das Ranking sind in Tabelle A.22 dargestellt.

Bewertung:

Bestanden

Erwartungsgemäß wird die Prüfung *KP2762* (Prüfung Lampe für Rückfahrlicht) am stärksten gewichtet. beim Vergleich der Tabelle A.22 mit den Tabellen A.20 und A.21 kann folgendes beobachtet werden:

1. Die ersten drei Prüfungen sind bei allen drei Verfahren gleich. Diese Prüfungen erfordern einen geringen Aufwand und führen zu einem hohen Informationsgewinn.
2. Im Vergleich zu Tabelle A.20 erfordern die Prüfungen 4, 5 und 6 in Tabelle A.22 deutlich weniger Aufwand.
3. Es werden (genau wie in Tabelle A.20) zuerst die Prüfungen mit 6min und anschließend die Prüfungen mit 8min ausgewählt. Während jedoch die Reihenfolge der Prüfungen mit gleichem Aufwand in Tabelle A.20 willkürlich ist, erfolgt das Ranking in Tabelle A.22 in diesen Fällen anhand der unterschiedlichen Informationsgewinne.

4. An Position #8 in Tabelle A.22 wird im Vergleich zu Tabelle A.20 bewusst eine Prüfung mit höherem Aufwand (17min statt 13min) ausgewählt, weil diese einen deutlich höheren Informationsgewinn aufweist. Das gleiche Verhalten lässt sich auch bei anderen Prüfungen erkennen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Anwendung der Formel (6.7) eine sinnvolle Kombination der zuvor beschriebenen Kenngrößen darstellt, was sich positiv auf das Ranking der Prüfungen auswirkt.

A.3.2 Veränderung der Gewichtung in Folge von Prüfergebnissen

Zu untersuchende Eigenschaften: Die Gewichtungen der Prüfungen, wie sie im Abschnitt A.3.1 dargestellt wurden, beruhen auf dem initialen Zustand des Systems. Sobald eine Prüfung durchgeführt und das Ergebnis in das Diagnosesystem eingegeben wurde, werden folgende Aktualisierungen durchgeführt:

- Aktualisierung der Fehlerkandidatenliste (Menge der Elemente sowie Fehlerwahrscheinlichkeiten)
- Aktualisierung der bisher nicht durchgeführten Prüfungen (u. a. Aktualisierung der kombinierten Fehlerwahrscheinlichkeiten)
- Prüfungen, die nicht mehr relevant sind, werden aus dem Prüfplan entfernt
- Aufnahme möglicher neuer Prüfungen in den Prüfplan
- Aktualisierung der Kosten der Prüfschritte, da u. U. Messpunkte freigelegt wurden

Auf Grund der geänderten Eingangsgrößen müssen die Berechnungen zur Gewichtung der Prüfungen nach jedem Prüfschritt erneut durchgeführt werden. Durch dieses Vorgehen, werden bei der Auswahl eines Prüfschritts alle Erkenntnisse bisher durchgeführter Prüfungen berücksichtigt. Dies ist eines der wichtigsten Leistungsmerkmale des dynamischen Prüfablaufs.

Es soll an einem konkreten Beispiel untersucht werden, ob und wie sich die einzelnen Gewichtungsfaktoren verändern, sobald dem Diagnosesystem neue Prüfergebnisse vorliegen.

Szenario: Es wird das gleiche reale Fehlerszenario wie für den Test A.3.1 verwendet.

Beschreibung: Nachdem das Diagnosesystem auf Grund des Symptoms DTC 1519 mögliche Fehlerkandidaten ermittelt und Prüfungen generiert hat, werden die folgenden vier Prüfungen nacheinander ausgeführt:

#	Prüfung	$ef(t_i)$	#	Prüfung	$ef(t_i)$
Durchgangsprüfungen			Spannungsmessung		
16	DP 6125p1–5884p5	0,023	19	SM 6113p1	0,007
18	DP 6125p1–2766p1	0,016	5	SM 5884p5	0,080
13	DP 6125p1–6841p3	0,034	2	SM 2766p1	0,138
14	DP 6841p3–5884p5	0,029	10	SM 6841p3	0,041
9	DP 6841p3–2766p1	0,043	Komponentenprüfung		
11	DP 2773p5–2766p1	0,038	6	KP 5884–2773	0,077
12	DP 2766p2–2771p1	0,035	7	KP 2771–5882	0,045
8	DP 2766p2–6917	0,044	1	KP 2765	0,140
15	DP 5882p1–6917	0,028	17	KP 6840	0,017
Masseprüfung			20	KP 6113	0,002
3	MP 2766p2	0,137			
4	MP 5882p1	0,082			

Tabelle A.22.: Ermittelte Effektivität und darauf beruhendes Ranking der Prüfungen

#	Fehlerkandidat	Schritt:	0	1	2	3	4
2765	Lampe für Rückfahrlicht		0,730				
2766	Stecker für Rückfahrlicht		0,035				
2771	Koppelstecker Heckklappe_2 (2771)		0,020	0,041			
2773	Koppelstecker Heckklappe_1 (2773)		0,079	0,166	0,262	0,360	0,421
2785	Splice 2785		0,021	0,043			
2790	Leitung 2790		0,010	0,013			
2791	Leitung 2791		0,010	0,013			
2805	Leitung 2805		0,010	0,013	0,015	0,017	0,019
5882	Koppelstecker Heckklappe_2 (5882)		0,020	0,041			
5884	Koppelstecker Heckklappe_1 (5884)		0,079	0,074	0,116		
6113	Bordnetzsteuergerät		0,016	0,019	0,023		
6125	Stecker B am Bordnetzsteuergerät		0,035	0,074	0,116		
6840	automatisch abblendbarer Innenspiegel		0,118	0,241	0,375	0,515	0,601
6841	Stecker Innenspiege		0,035	0,072	0,113	0,156	
6915	Massepunkt nähe Anhängerkupplung		0,052	0,108			
6917	Kabelschuh am Massepunkt		0,052	0,108			
6988	Splice 6988		0,021	0,043			
7055	Splice 7055		0,021	0,043	0,068		
7461	Leitung 7461		0,010	0,013			
7462	Leitung 7462		0,010	0,013			
8076	Leitung 8076		0,010	0,013	0,015	0,017	
8078	Leitung 8078		0,010	0,013	0,015		
8081	Leitung 8081		0,010	0,013	0,015		

Tabelle A.23.: Fehlerwahrscheinlichkeiten zu Beginn (0) sowie nach jedem weiteren Prüfschritt

1. KP 2765 – Prüfung Lampe für Rückfahrlicht einschließlich Lampenträger und Stecker
2. MP 2766p2 – Masseprüfung am Stecker Lampe Rückfahrlicht Pin2
3. SM-5884p5 – Spannungsmessung am Stecker Heckklappe_1a Pin 5
4. SM-6841p3 – SM am Stecker Innenspiegel Pin 3

Jede der Prüfungen liefert *pass* als Ergebnis. D.h. alle jeweils überprüften Komponenten sind in Ordnung. Es wird untersucht, wie sich die Menge und Wahrscheinlichkeit der Fehlerkandidaten sowie die Menge und Gewichtung der verfügbaren Prüfungen ändert.

Erwartung: Auf Grund des Ergebnisses einer Prüfung ändern sich die Elemente der Fehlerkandidatenliste. Wenn die Prüfungen ein *pass* liefern, sollte sich die Menge der Fehlerkandidaten reduzieren. Die Fehlerwahrscheinlichkeiten der verbleibenden Kandidaten sollte sich tendenziell erhöhen. Dadurch ändern sich auch die kombinierten Fehlerwahrscheinlichkeiten der Prüfungen. Wenn bei der Durchführung einer Prüfung Messpunkte freigelegt werden, kann sich der notwendige Aufwand späterer Prüfungen reduzieren.

Ergebnis: Die Tabelle A.23 stellt die berechneten Fehlerwahrscheinlichkeiten der beteiligten Komponenten nach jedem Prüfschritt dar. Die Spalte *Schritt* : 0 enthält die initiale Fehlerkandidatenliste. Die Tabelle A.24 stellt die Gewichtungen der Prüfungen nach jedem Prüfschritt dar. Die Spalten mit der Überschrift *P* geben jeweils die kombinierten Fehlerwahrscheinlichkeiten der Prüfungen an. *C* entspricht dem erwarteten Aufwand in Minuten, *ef* ist die berechnete Effektivität.

Bei genauerer Betrachtung der Tabellen A.23 und A.24 kann folgendes Verhalten beobachtet werden:

Nach dem ersten Prüfschritt (Lampe und Stecker sind i. O.):

Prüfung	Prüfschritt 1			Prüfschritt 2			Prüfschritt 3			Prüfschritt 4		
	P	C	ef	P	C	ef	P	C	ef	P	C	ef
DP 6125p1-5884p5	0,20	26	0,03	0,29	26	0,03						
DP 6125p1-2766p1	0,20	31	0,02	0,29	31	0,03	0,17	31	0,02			
DP 6125p1-6841p3	0,34	21	0,04	0,49	21	0,05	0,37	21	0,05	0,43	21	0,05
DP 6841p3-5884p5	0,20	21	0,03	0,29	21	0,04	0,17	18	0,04			
DP 6841p3-2766p1	0,34	16	0,06	0,49	16	0,06	0,48	16	0,06	0,43	13	0,08
DP 2773p5-2766p1	0,18	11	0,06	0,27	11	0,08	0,37	8	0,12	0,43	8	0,12
DP 2766p2-2771p1	0,07	11	0,03									
DP 2766p2-6917	0,07	14	0,03									
DP 5882p1-6917	0,21	19	0,04									
SM 6113p1	0,02	18	0,01	0,02	18	0,01						
SM 5884p5	0,22	8	0,09	0,31	8	0,11						
SM 2766p1	0,35	3	0,31	0,50	3	0,33	0,37	3	0,32	0,43	3	0,33
SM 6841p3	0,21	13	0,06	0,31	13	0,07	0,17	13	0,05			
MP 2766p2	0,17	3	0,22									
MP 5882p1	0,11	8	0,06									
KP 5884-2773	0,23	8	0,10	0,35	8	0,12	0,36	5	0,19	0,42	5	0,20
KP 2771-5882	0,12	8	0,07	0,19	8	0,09						
KP 2765												
KP 6840	0,24	30	0,03	0,38	30	0,03	0,52	30	0,03	0,60	30	0,03
KP 6113	0,02	60	0,00	0,02	60	0,00						

Tabelle A.24.: Veränderung von P , C und ef nach jedem durchgeführten Prüfschritt – Die initialen Werte (Schritt 0) können den Tabellen A.20 bis A.22 entnommen werden.

- Es konnten zwei Fehlerkandidaten ausgeschlossen werden.
- Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Fehlerkandidaten ändert sich im Vergleich zur initialen Fehlerkandidatenliste deutlich.
- Für alle Prüfungen, welche den Stecker der Lampe als Messpunkt benötigen, reduziert sich der Aufwand um 3min (verglichen mit Tabelle A.20).
- Die Menge der Prüfungen reduziert sich nur um die eine durchgeführte.

Nach dem zweiten Prüfschritt (gesamter Massepfad ist i. O.):

- Obwohl nur ein Test durchgeführt wurde, reduziert sich die Anzahl der Tests um fünf.
- Es konnten zehn Fehlerkandidaten ausgeschlossen werden.
- Die Aufwände ändern sich nicht, da kein neuer Messpunkt freigelegt wurde.
- Durch den Ausschluss einiger Fehlerkandidaten erhöhen sich die Wahrscheinlichkeiten der übrigen Fehlerkandidaten und somit auch die kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeiten der Prüfungen sowie deren Effektivitäten.

nach dem dritten Prüfschritt (Signalprüfung am Koppelstecker ist i. O.):

- Die Menge der Prüfschritte reduziert sich um fünf.
- Es konnten sechs der Fehlerkandidaten ausgeschlossen werden, die Wahrscheinlichkeiten der übrigen Kandidaten hat sich erhöht.
- Die kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit der Prüfungen hat sich teilweise verringert und teilweise erhöht.
- Der Aufwand der verbliebenen Prüfungen hat sich teilweise verringert.
- Die berechnete Effektivität der Prüfungen hat sich teilweise nach oben, teilweise nach unten verschoben.

nach dem vierten Prüfschritt (Spannungsmessung am Stecker des Innenspiegels ist i. O.):

- Die Menge der Prüfungen hat sich um vier reduziert.

- Zwei Fehlerkandidaten konnten ausgeschlossen werden.
- Die Gewichtung der verbliebenen Prüfungen hat sich erneut geändert.

Bewertung:

Bestanden

Es ist zu erkennen, dass sich sowohl die Fehlerkandidatenliste als auch der Prüfplan nach jedem Prüfschritt ändern. Auch die Gewichtungsfaktoren, die im Normalfall für die Auswahl der nächsten Prüfung verwendet werden, ändern sich nach jedem Schritt. Das Verhalten entspricht den Anforderungen aus Abschnitt 6.2.

A.3.3 Benutzerinteraktion

Im Kapitel 6 wurden verschiedene Anforderungen an die Möglichkeiten zur Benutzerinteraktion mit dem Prüfplan definiert. So soll es möglich sein, vorgeschlagene Prüfungen zu überspringen oder bereits durchgeführte oder übersprungene Prüfungen zu einem späteren Zeitpunkt erneut aufzurufen. Über die Prüfplanansicht soll der Anwender Prüfungen selbständig auswählen und dadurch die vom System bereitgestellte automatische Prüfauswahl umgehen können.

Liegen in einem Fahrzeug mehrere unabhängige Fehler vor, werden sowohl die Fehlerkandidaten als auch die Prüfungen im Prüfplan automatisch geclustert. Der dynamische Prüfablauf berechnet für jeden Cluster jeweils eine eigene Prüfsequenz. Der Anwender soll auswählen können, für welchen Cluster zunächst die Fehlerursache gefunden werden soll.

Zu untersuchende Eigenschaften: Es soll untersucht werden, wie die Benutzerinteraktion mit dem dynamischen Prüfplan abläuft, wenn unabhängige Fehler vorliegen.

Szenario: Das Szenario, das bereits in A.3.1 und A.3.2 verwendet wurde (DTC 1519), wird durch einen zweiten Fehler ergänzt. Der DTC 1497 beschreibt einen Fehler bei der Ansteuerung der Lampe für das Blinklicht vorne rechts. Da das Bordnetzsteuergerät an sich funktioniert (ansonsten wären andere Fehlersymptome vorhanden), sind die beiden Fehler unabhängig voneinander.

Beschreibung: Die beiden genannten Fehlersymptome werden manuell in das Diagnosesystem eingegeben. Daraufhin generiert das System eine Fehlerkandidatenliste mit zwei Clustern. Nachdem aus dieser Liste bereits einige Fehlerkandidaten manuell ausgeschlossen wurden, werden Prüfungen generiert. Eine der Prüfungen wird manuell ausgewählt und ausgeführt.

Ergebnis: Die Abbildung A.4 zeigt die Fehlerkandidatenliste. Es wurden bereits einige Fehlerkandidaten manuell auf i. O. gesetzt, damit beide Cluster sichtbar sind. In diese Ansicht kann jederzeit gewechselt werden, um sich einen Überblick zu verschaffen oder um die Evidenz eines Bauteils zu ändern bzw. zu entfernen.

Die Abbildung A.5 zeigt den Prüfplan, der ebenfalls aus zwei Clustern besteht. Es wurden bereits einige Prüfungen durchgeführt, so dass die Menge der Prüfungen bereits so weit verkleinert ist, dass beide Cluster auf eine Bildschirmseite passen. Der Cluster 1 enthält eine Top-Prüfung (vgl. Abschnitt 6.4.2). Die letzte durchgeführte Prüfung stammte jedoch aus dem Cluster 2. Dadurch ist dieser Cluster aktiv. Das System würde in dieser Situation von sich aus die Prüfung 1 aus Cluster 2 auswählen. Über die Auswahl auf der rechten Seite können jedoch auch andere Prüfungen ausgewählt werden. Am Ende des Prüfplans stehen Prüfungen, die bereits durchgeführt oder auf „ignorieren“ gesetzt wurden. Auch diese Prüfungen können manuell ausgewählt werden, um z. B. einen eingegebenen Befund nachträglich zu ändern.

Die Abbildung A.6 zeigt eine Prüfanweisung zur Durchführung einer Signalprüfung. Im Gegensatz zu Masseprüfungen enthalten Signalprüfungen vielfach Vorbedingungen, welche das System

Candidates - Mozilla Firefox

Start Symptome Kandidaten Prüfungen Dialog

VIN: VVVZZZ1KZ6W163697 Fehlerkandidaten

IFID	Fehlerkandidaten	Fehler Wahrsch.	n.i.O.	i.O.	???
Cluster 1: DTC 1497 Lampe für Blinklicht vorne rechts-M7 BSG26V.1.NW					
5934	Lampe Halogenscheinwerfer rechts (Top-Kandidat!)	0.712	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6645	GND Scheinwerfer rechts	0.163	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5935	STK am Scheinwerfer rechts	0.138	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6162	STK am BordnetzSTG	0.111	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
7051	Splice im Kabelstrang	0.065	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
8084	BTL-Leitung	0.015	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Cluster 2: DTC 1519 Lampe für Rückfahrlicht rechts-M17 BSG26V.1.NW					
6840	automatisch_abblendbarer_Innenspiegel	0.515	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2773	Koppelstecker Heckklappe_1	0.262	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6841	Stecker Innenspiegel	0.156	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2805	BTL-Leitung	0.017	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
8076	BTL-Leitung	0.017	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
bereits geprüfte Komponenten:					
2765	Lampe für Rückfahrlicht	0.000	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2766	Stecker für Rückfahrlicht	0.000	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Hauptmenü Neuberechnung Prüfungen generieren

Abbildung A.4.: Fehlerkandidatenliste mit zwei Clustern

Test List - Mozilla Firefox

Start Symptome Kandidaten Prüfungen Dialog

VIN: VVVZZZ1KZ6W163697 Prüfplan

#	Art	Beschreibung	Effektivität	
Vorgeschlagene Prüfung durchführen (Cluster 2 Prüfung 1)				
Cluster 2 (aktiv): DTC 1519 Lampe für Rückfahrlicht rechts-M17 BSG26V.1.NW				
1	SP	Spannungsmessung am Stecker Lampe Rückfahrlicht Pin1		<input type="radio"/>
2	MP	Masseprüfung am Stecker Lampe Rückfahrlicht Pin2		<input type="radio"/>
3	KP	Prüfung Stecker Heckklappe_1		<input type="radio"/>
4	SM	Spannungsmessung am Stecker Heckklappe_1a Pin 5		<input type="radio"/>
5	MP	Masseprüfung am Stecker Heckklappe_2a Pin 1		<input type="radio"/>
6	DP	Durchgangsprüfung Stecker Heckklappe_1b Pin 5 --> Stecker Lampe Rückfahrlicht Pin1		<input type="radio"/>
7	DP	Durchgangsprüfung Stecker Innenspiegel Pin 3 --> Stecker Lampe Rückfahrlicht Pin1		<input type="radio"/>
8	SM	Spannungsmessung am Stecker Innenspiegel Pin 3		<input type="radio"/>
Cluster 1 (nicht aktiv): DTC 1497 Lampe für Blinklicht vorne rechts-M7 BSG26V.1.NW				
1	KP	Überprüfung Lampe Halogenscheinwerfer rechts (Top-Prüfung!)		<input type="radio"/>
2	MP	Masseprüfung am Stecker Halogenscheinwerfer rechts Pin 1		<input type="radio"/>
3	DP	Durchgangsprüfung Stecker Halogenscheinwerfer rechts Pin 1 --> GND Scheinwerfer rechts		<input type="radio"/>
Bisher durchgeführte Prüfungen				
1	DP	Durchgangsprüfung Stecker B am BSG Pin 1 --> Stecker Innenspiegel Pin 3		<input type="radio"/>
2	DP	Durchgangsprüfung Stecker Innenspiegel Pin 3 --> Stecker Heckklappe_1a Pin 5		<input type="radio"/>

Fehlerkandidaten Test durchführen

Abbildung A.5.: Geclusterter Prüfplan

Abbildung A.6.: Signalprüfung am Rückfahrscheinwerfer

aus dem Datensatz der Signalbeschreibungen entnimmt. Im unteren Bereich des Dialogs kann der Anwender das Ergebnis der Prüfung eingeben und mit „Weiter“ bestätigen. Wenn in einer Prüfanweisung „Diese Prüfung ignorieren“ angeklickt wird, wird diese Prüfung vom System nicht mehr automatisch vorgeschlagen. Im Normalfall sollte jedoch das Ergebnis der durchgeführten Prüfung ausgewählt werden. Wenn der Anwender im Anschluss auf „Weiter“ klickt, wird das Ergebnis übernommen und nach einer Aktualisierung von Fehlerkandidatenliste und Prüfplan automatisch die nächste Prüfung ausgewählt und angezeigt. Mit Hilfe der Schaltfläche „Prüfplan“ kann der Anwender jederzeit in die Prüfplanansicht und darüber auch in die Fehlerkandidatenliste wechseln.

Bewertung:

Bestanden

Die Möglichkeiten der Benutzerinteraktion entsprechen den Anforderungen aus Abschnitt 6.2.

A.3.4 Vergleich der Gewichtungungsverfahren

Zu untersuchende Eigenschaften: Mit diesem Testfall soll untersucht werden, wie sich die Verwendung der unterschiedlichen Gewichtungungsverfahren auf die Reihenfolge der Prüfungen im Prüfplan auswirkt. Ziel ist es, die Fehlerursache mit möglichst wenigen einfachen Prüfungen zu identifizieren

Szenario: Es kommt das gleiche Fehlerszenario wie in den Abschnitten A.3.1 und A.3.2 zum Einsatz.

Beschreibung: Um die Fehlerursache mit möglichst geringem Aufwand identifizieren zu können, muss jeweils die beste der zur Verfügung stehenden Prüfungen ausgewählt werden. Für das Ranking wurden im Abschnitt A.3.1 drei Verfahren untersucht. Auf Basis dieser drei Verfahren sollen im Folgenden jeweils zwei Prüfabläufe erstellt und diskutiert werden. Im ersten

	<i>Prüfung</i>	<i>Beschreibung</i>	$P(f_{ii})$	$C(PZ)$	ef	f_{ii}	ΣC
Auswahlkriterium: Aufwand							
1	KP 2765	Überprüfung Lampe	0,730	6min	0,140	pass	6min
2	KP 2765	Überprüfung Stk. der Lampe	0,137	3min	0,192	pass	9min
3	MP 2766p2	Masse Pr. am Stk. der Lampe	0,286	3min	0,288	fail	12min
4	SM 2766p1	Sp. Mess. am Stk. der Lampe	0,684	3min	0,300	fail	15min
5	KP 5884-2773	Prüfung Koppelstecker	0,215	8min	0,094	pass	23min
6	SM 5884p5	Sp. Mess. am Koppelstecker	0,692	3min	0,297	pass	26min
7	DP 2773p5-2766p1	DP Lampe – Koppelstecker	0,856	6min	0,099	fail	32min
Auswahlkriterium: kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit							
1	KP 2765	Überprüfung Lampe	0,730	6min	0,140	pass	6min
2	SM 2766p1	Sp. Mess. am Stk. der Lampe	0,346	3min	0,310	fail	9min
3	DP 6125p1-2766p1	Durchgangspr. Lampe – BSG	0,873	21min	0,062	fail	30min
4	DP 6125p1-5884p5	DP Koppelstecker – BSG	0,732	11min	0,076	pass	41min
5	KP 5884-2773	Prüfung Koppelstecker	0,660	3min	0,308	pass	44min
6	KP 2765	Überprüfung Stk. der Lampe	0,920	3min	0,134	pass	47min
Auswahlkriterium: zweistufige Prüfstrategie							
1	KP 2765	Überprüfung Lampe	0,730	6min	0,140	pass	6min
2	SM 2766p1	Sp. Mess. am Stk. der Lampe	0,346	3min	0,310	fail	9min
3	KP 2765	Überprüfung Stk. der Lampe	0,236	3min	0,263	pass	12min
4	SM 5884p5	Sp. Mess. am Koppelstecker	0,523	9min	0,111	pass	21min
5	KP 5884-2773	Prüfung Koppelstecker	0,873	3min	0,183	fail	24min

Tabelle A.25.: Prüfsequenzen für Fehlerfall 1: Leitung 2805

untersuchten Fehlerfall, wird die Leitung 2805 (vgl. Abbildung A.1) als defekt angenommen. Im zweiten Fall wird von einem defekten Splice 7055 ausgegangen.

In diesem Test werden, nachdem die Prüfanweisungen vom System ausgegeben wurden, Prüfergebnisse entsprechend der Fehlersituation eingegeben. Die Sequenz endet erst, wenn das fehlerverursachende Bauteil identifiziert worden ist. Dies kann folgendermaßen erfolgen:

- durch Ausschluss – wenn die Fehlerkandidatenliste nur noch ein Element enthält oder aber eines der enthaltenen Elemente eine Fehlerwahrscheinlichkeit von $> 0,95$ aufweist, oder
- in Folge einer Prüfung – wenn eine Prüfung ein einzelnes Bauteil als fehlerhaft identifiziert.

Erwartung: Es wird erwartet, dass die zweistufige Prüfstrategie in beiden Fällen zum Prüfablauf mit dem geringsten Gesamtaufwand führt.

Ergebnis: Die Tabellen A.25 und A.26 stellen das Ergebnis der beiden untersuchten Fehlerfälle dar. Die Spalte $P(f_{ii})$ enthält die kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit der ausgewählten Prüfung. Die Spalte $C(PZ)$ gibt den erwarteten Aufwand der Prüfung an. Die Spalte ef enthält die nach Formel (6.7) berechnete Effektivität. In der Spalte f_{ii} ist das Ergebnis der Prüfung angegeben (pass: keinen Fehler erkannt, fail: Fehler erkannt). ΣC ist der Gesamtaufwand aller bisher durchgeführten Schritte.

Prinzipiell entstehen mit Hilfe des Auswahlkriteriums „Aufwand“ eher Prüfsequenzen mit einem geringeren Aufwand, während durch das Auswahlkriterium „kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit“ eher Sequenzen mit einer geringen Anzahl von Prüfschritten entstehen, da vorzugsweise Prüfungen ausgewählt werden, die mit einer hohen Wahrscheinlichkeit zum Fehlerkandidaten führen. Besonders interessant bei dieser Untersuchung ist, dass die Anzahl der notwendigen Prüfschritte für Auswahl anhand der „zweistufigen Prüfstrategie“ sogar noch geringer ist als bei der Auswahl anhand der „kombinierten Fehlerwahrscheinlichkeit“. Theoretisch müsste sich das

	<i>Prüfung</i>	<i>Beschreibung</i>	$P(f_{ii})$	$C(PZ)$	ef	f_{ii}	ΣC
Auswahlkriterium: Aufwand							
1	KP 2765	Überprüfung Lampe	0,730	6min	0,140	6min	pass
2	KP 2766	Überprüfung Stk. der Lampe	0,137	3min	0,192	pass	9min
3	MP 2766p2	Masse Pr. am Stk. der Lampe	0,286	3min	0,288	pass	12min
4	SM 2766p1	Sp. Mess. am Stk. der Lampe	0,684	3min	0,300	fail	15min
5	KP 5884-2773	Prüfung Koppelstecker	0,215	8min	0,094	pass	23min
6	SM 5884p5	Sp. Mess. am Koppelstecker	0,692	3min	0,297	fail	26min
7	SM 6841p3	Sp. Mess. am Spiegel	0,763	13min	0,061	fail	39min
8	DP 6841p3-5884p5	DP Spiegel – Koppelstecker	0,926	6min	0,063	fail	45min
Auswahlkriterium: kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit							
1	KP 2765	Überprüfung Lampe	0,730	6min	0,140	6min	pass
2	SM 2766p1	Sp. Mess. am Stk. der Lampe	0,346	3min	0,310	fail	9min
3	DP 6125p1-2766p1	Durchgangspr. Lampe – BSG	0,873	21min	0,026	fail	30min
4	DP 6125p1-5884p5	DP Koppelstecker – BSG	0,732	21min	0,040	fail	51min
5	DP 6841p3-2766p1	DP Spiegel – Lampe	0,720	16min	0,053	fail	67min
6	DP 6125p1-6841p3	DP Spiegel – BSG	0,865	6min	0,095	fail	73min
Auswahlkriterium: zweistufige Prüfstrategie							
1	KP 2765	Überprüfung Lampe u. Stecker	0,730	6min	0,140	pass	6min
2	SM 2766p1	Sp. Mess. am Stk. der Lampe	0,346	3min	0,310	fail	9min
3	KP 2766	Überprüfung Stk. der Lampe	0,136	3min	0,191	pass	12min
4	SM 5884p5	Sp. Mess. am Koppelstecker	0,523	9min	0,111	fail	21min
5	SM 6841p3	SM am Stecker Innenspiegel	0,563	13min	0,076	fail	34min
6	DP 6841p3-5884p5	DP Spiegel Koppelstecker	0,478	6min	0,166	fail	40min

Tabelle A.26.: Prüfsequenzen für Fehlerfall 2: Splice 7055

Bild anders herum darstellen. Der klare Vorteil der zweistufigen Prüfstrategie könnte daher in anderen Fehlerszenarien geringer ausfallen.

In Tabelle A.27 sind die Durchschnittswerte der ermittelten Kenngrößen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Anzahl der notwendigen Prüfungen am höchsten ist, wenn anhand des Aufwands ausgewählt wird. Dafür ist der durchschnittliche Aufwand zur Durchführung der Prüfungen in diesem Fall am geringsten. Werden die Prüfungen anhand der kombinierten Fehlerwahrscheinlichkeit ausgewählt, werden weniger Prüfschritte (6 statt 7,5) benötigt. Dafür ist jedoch der durchschnittliche Aufwand pro Prüfung am höchsten. Bei der Auswahl anhand der zweistufigen Prüfstrategie ist der durchschnittliche Aufwand pro Prüfung nur geringfügig höher als bei der Auswahl anhand des Aufwandes. Dafür ist jedoch die Anzahl der notwendigen Prüfschritte und dadurch der Gesamtaufwand der Prüfsequenz deutlich geringer. Die durchschnittliche Fehlerwahrscheinlichkeit bei Verwendung der zweistufigen Prüfstrategie liegt sehr nah bei 0,5. Dadurch entsteht ein hoher Informationsgewinn bei der Durchführung einer Prüfung.

Beim Fehlerfall 1 wurden durch Anwendung der zweistufigen Prüfstrategie nur 5 statt 7 bzw. 6 Prüfschritte benötigt. Auch reduziert sich der Prüfaufwand der gesamten Sequenz dadurch um 8 bzw. 23 Minuten was einer Einsparung von 25% bzw. 49% entspricht. Beim Fehlerfall 2 konnte der Aufwand um 5 min (entspricht 11%) bzw. um 33 min (entspricht 45%) reduziert werden.

<i>Auswahlkriterium</i>	<i># Schritte</i>	$C(PZ)$	$P(f_{ii})$	$H(f_{ii})$	ef
Aufwand	7,5	5,1 min	0,534	0,762	0,190
kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit	6	10,0 min	0,711	0,756	0,138
zweistufige Prüfstrategie	5,5	5,7 min	0,502	0,855	0,184

Tabelle A.27.: Durchschnittswerte der Kenngrößen aus den Fehlerfall 1 und Fehlerfall 2

Bewertung:

Bestanden

Es konnte gezeigt werden, dass das System sinnvolle Prüfabläufe zur Identifikation der fehlerverursachenden Bauteile generieren kann. Anhand von zwei Beispielen wurde gezeigt, dass mit Hilfe der zweistufigen Prüfstrategie im Vergleich zu den beiden anderen Verfahren eine deutlich effizientere Fehlersuche möglich ist. Im Vergleich mit der Prüfungsauswahl anhand des zu erwartenden Aufwands führt die zweistufige Prüfstrategie zu einer um 18% effizienteren Prüffrequenz. Im Vergleich mit der Auswahl anhand der kombinierten Fehlerwahrscheinlichkeit ist die zweistufige Prüfstrategie sogar um 47% effizienter.

Tabellenverzeichnis

1.1. Verschiedene Arten von Diagnosewissen anhand von Beispielen	2
2.1. Unterscheidung zw. On- und Off-Board-Diagnose	6
2.2. Funktionen der Fahrzeugdiagnose	6
4.1. Exemplarische Beschreibung der vom Steuergerät erkennbaren Fehlerzustände .	38
4.2. Ermittlung von Wirkketten – Zuordnung Fehlerkandidaten zu Fehlersymptomen .	39
4.3. Tabellarische Darstellung der Abhängigkeiten	50
4.4. Matrix der gefundenen Paare	50
4.5. Abhängigkeiten nach dem Hinzufügen eines Logikknotens	50
4.6. Abhängigkeiten nach dem Hinzufügen aller Logikknoten	51
4.7. Matrix der Ursachenpaare nach Hinzufügen aller Logikknoten	51
4.8. Abdeckung der Anforderungen durch Prüfungen	58
5.1. Beispiele für Signaldefinitionen	69
5.2. Bauteilspezifische Informationen bzgl. Signalbeschreibungen und Abhängigkeiten	76
5.3. Abdeckung der Anforderungen durch Prüfungen	80
6.1. Abdeckung der Anforderungen durch Prüfungen	98
7.1. Daten für das Diagnosesystem	103
7.2. Bewertung des zu untersuchenden Systems im Vergleich zum Stand der Technik .	108
7.3. Bewertung der Anwendungsfälle und Einsatzbereiche von FiDis	108
7.4. Bewertung der technischen Machbarkeit von FiDis gegenüber der GFS	109
7.5. Bewertung der Kosten von FiDis gegenüber der GFS	110
7.6. Bewertung der Leistungsfähigkeit von FiDis gegenüber der GFS	111
7.7. Bewertung der Anwendbarkeit und Nutzerakzeptanz von FiDis gegenüber der GFS	112
7.8. Konzeptbewertung eines Diagnose Internetportals für die Fahrzeugdiagnose . . .	115
7.9. Konzeptbewertung für das Diagnosesystem Neucus Quelle: [Mül11]	116
7.10. Fehlerfall 1: Ergebnisse der FiDis-Fehlerkandidatenermittlung sowie der Neucus Diagnose-Hypothesen	118
7.11. Fehlerfall 1: Ausgegebene Prüfanweisungen von FiDis und der GFS	119
7.12. Fehlerfall 2: Ergebnisse der FiDis-Fehlerkandidatenermittlung sowie der Neucus Diagnose-Hypothesen	120
7.13. Fehlerfall 2: Ausgegebene Prüfanweisungen von FiDis und der GFS	120
7.14. Fehlerfall 3: Ergebnisse der FiDis-Fehlerkandidatenermittlung sowie der Neucus Diagnose-Hypothesen	120
7.15. Fehlerfall 3: Ausgegebene Prüfanweisungen von FiDis und der GFS	121
7.16. Fehlerfall 4: Ergebnisse der FiDis-Fehlerkandidatenermittlung sowie der Neucus Diagnose-Hypothesen	121
7.17. Fehlerfall 4: Ausgegebene Prüfanweisungen von FiDis und der GFS	122
7.18. Fehlerfall 5: Ergebnisse der FiDis-Fehlerkandidatenermittlung sowie der Neucus Diagnose-Hypothesen	122
7.19. Fehlerfall 5: Ausgegebene Prüfanweisungen von FiDis und der GFS	122
7.20. Fehlerfall 6: Ergebnisse der FiDis-Fehlerkandidatenermittlung sowie der Neucus Diagnose-Hypothesen	123
7.21. Fehlerfall 6: Ausgegebene Prüfanweisungen von FiDis und der GFS	123

7.22. Kategorisierung der Fehlerursachen	125
A.1. Fehlerkandidaten auf Grund des DTC 1519	141
A.2. Fehlerkandidaten nach dem zwei Bauteile überprüft wurden	141
A.3. Fehlerkandidaten nachdem ein fehlerhaftes Bauteil identifiziert wurden	142
A.4. Ergebnisse bei separater Betrachtung der Symptome	143
A.5. Ergebnisse bei gemeinsamer Betrachtung der Symptome	143
A.6. Fehlerkandidatenliste mit zwei Clustern	145
A.7. Ergebnisw, mit fehlerhaften Strukturdaten	146
A.8. Variation der Ausfallwahrscheinlichkeiten	146
A.9. Einfluss der Ausfallwahrscheinlichkeiten	147
A.10. Größe ausgewählter Netze	148
A.11. Einfluss der maximalen Zahl von Elternknoten auf die TCS eines Netzes	149
A.12. Laufzeit der Berechnungsschritte	150
A.13. Generierte Durchgangsprüfungen	153
A.14. Generierte Signalprüfungen für die Leitung 7573	153
A.15. Generierte Masseprüfungen für die Leitungen 7458 und 7459	154
A.16. Generierte Prüfungen für Testfall A.2.3	155
A.17. Geprüfte Komponenten der Prüfungen aus Tabelle A.16	155
A.18. Einfluss der Anzahl von Signalen auf die Anzahl möglicher Signalprüfungen	157
A.19. Aufwand der Arbeitspositionen (Expertenwissen)	158
A.20. Vom System ermittelte Aufwände einzelner Prüfschritte	159
A.21. Kombinierte Fehlerwahrscheinlichkeit sowie Entropie und Ranking	160
A.22. Ermittelte Effektivität und darauf beruhendes Ranking der Prüfungen	161
A.23. Fehlerwahrscheinlichkeiten zu Beginn (0) sowie nach jedem weiteren Prüfschritt	162
A.24. Veränderung von P , C und ef nach jedem Prüfschritt	163
A.25. Prüfsequenzen für Fehlerfall 1: Leitung 2805	167
A.26. Prüfsequenzen für Fehlerfall 2: Splice 7055	168
A.27. Durchschnittswerte der Kenngrößen aus den Fehlerfall 1 und Fehlerfall 2	168

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Einsatz eines ASAM MCD 3D Servers in einem Diagnosesystem	12
2.2.	Struktur einer modellbasierten Diagnose [Hei99]	16
2.3.	Einfaches Bayes-Netz zur Modellierung von Abhängigkeiten	21
2.4.	Grundformen von Bayes-Netzen [HSA99]	22
2.5.	Informationsfluss in Bayes-Netzen, interne Größen eines Knotens	23
4.1.	Übersicht – wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung	34
4.2.	Beispiel zur Extraktion von Wirkketten aus einem Stromlaufplan	38
4.3.	Alternative Bayes-Netze zur Modellierung einer logischen OR-Verknüpfung	42
4.4.	Logische OR- und AND-Verknüpfungen	42
4.5.	Alternative Bayes-Netze zur Modellierung einer logischen AND-Verknüpfung	43
4.6.	Ausschnitt Stromlaufplan Klimaanlage	44
4.7.	Bayes-Netz mit Wirkkettenknoten (WK1 bis WK4)	44
4.8.	Ausschnitt aus Abbildung 4.7 zur Verdeutlichung der bedingten Abhängigkeiten	45
4.9.	Reduzierung der TCS von 32 auf 24 durch Einfügen von Knoten	48
4.10.	Einfluss der Anzahl der Elternknoten auf die TCS	49
4.11.	Bayes-Netz zur Verdeutlichung des Optimierungspotenzials	49
4.12.	Bayes-Netz nach dem logischen Zusammenfassen	52
4.13.	Optimiertes Netz – max. Elternzahl: 3	52
4.14.	Optimiertes Netz – max. Elternzahl: 2	52
4.15.	Anzeige der vorhandenen Symptome mit Bearbeitungsmöglichkeit	55
4.16.	Ausgabe der Fehlerkandidatenliste	56
5.1.	Prüfanweisung einer Spannungsprüfung	65
5.2.	Ausschnitt aus einem Stromlaufplan und dem dazugehörigen Graph	66
5.3.	Ermittlung von Messpunkten für Splice Nr. 7 aus Abbildung 5.2	67
5.4.	Signalpropagierung ausgehend vom Abgang der Sicherung 4	70
5.5.	Spannungsprüfung an drei Messpunkten	71
5.6.	Propagierung von Massesignalen	72
5.7.	Messadapter zur Überprüfung von Signalen und Strömen	76
5.8.	Stromlaufplanausschnittes beim Diagnosesystem Intelligent Finder	79
6.1.	Ablaufdiagramm: Fehlersuche und Instandsetzung	83
6.2.	Entropie $H(f_{ti})$ der Prüfung t_i abhängig von der Wahrscheinlichkeit $P(f_{ti} = fail)$	90
6.3.	Clusterung der Fehlerkandidaten und Prüfungen	94
6.4.	Gewichteter Prüfplan	95
6.5.	Aktualisierung des Prüfplans	95
7.1.	Überblick der Softwarekomponenten von FiDis	102
7.2.	FiDis: Symptomeingabe	104
7.3.	FiDis: Geclusterte Fehlerkandidatenliste	104
7.4.	FiDis: Dynamischer Prüfplan	105
7.5.	FiDis: Prüfanweisung Signalprüfung	105
7.6.	Kriterien der Konzeptbewertung [MKF08]	107
7.7.	Ergebnisse der Konzeptuntersuchung FiDis	113
7.8.	Gegenüberstellung der Ergebnisse der Konzeptuntersuchungen	117
7.9.	Vergleich Zeitbedarf und Anz. der Prüfschritte	124

7.10. Position der tatsächlichen Ursache in der initialen Fehlerkandidatenliste	126
7.11. Berechnete Fehlerwahrscheinlichkeiten	127
7.12. Berechnete Fehlerwahrscheinlichkeiten bei verringerter Diagnosetiefe	127
7.13. Anzahl der notwendigen Prüfschritte	129
7.14. Geschätzter Arbeitsaufwand bei Verwendung der GFS	131
7.15. Geschätzter Arbeitsaufwand bei Verwendung von FiDis	131
7.16. Differenz der geschätzten Arbeitsaufwände	131
A.1. Darstellung der strukturbeschreibenden Daten für Prüfung A.1.1 als Stromlaufplan	140
A.2. Schalterbeleuchtung der Amaturentafel (Ausschnitt aus Stromlaufplan)	151
A.3. Ausgabe einer Prüfanweisung (Durchgangsprüfung)	152
A.4. Fehlerkandidatenliste mit zwei Clustern	165
A.5. Geclusterter Prüfplan	165
A.6. Signalprüfung am Rückfahrscheinwerfer	166

Abkürzungen

i. O.	in Ordnung
n.i. O.	nicht in Ordnung
API	Application Programming Interface
ASAM	Association for Standardization of Automation and Measuring Systems
CAN	Controller Area Network
CPT	Conditional Probability Table, dt. Tabelle bedingter Wahrscheinlichkeiten
DAG	Directed Acyclic Graph, dt. gerichteter zyklensfreier Graph
DTC	Diagnostic Trouble Code, dt. Fehlercodes
EOBD	Euro-On-Board-Diagnose (für Länder der EU)
FiDis	Fahrzeugindividuelles Diagnosesystem
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis
FTA	Fault Tree Analysis, dt. Fehlerbaumanalyse
GFS	Geführte Fehlersuche
ISO	International Organization for Standardization
KWP	Key Word Protocol
LIN	Local Interconnect Network
MOST	Media Oriented Systems Transport
OBD	On-Board-Diagnose
OBD-II	On-Board-Diagnose der zweiten Generation (für Nordamerika)
ODX	Open Diagnostic Exchange
SOP	Start Of Production, dt. Beginn der Serienfertigung
TCS	total CPT size, dt. Größe aller CPTs zusammen
UDS	Unified Diagnostic Services
VCI	Vehicle Communication Interfaces
VIN	Vehicle Identification Number, dt. Fahrgestellnummer

Symbolverzeichnis

$Bel(B)$	. . . Vektor der Zustandswahrscheinlichkeiten im Knoten eines Bayes-Netzes
$CS(X)$	. . . Anzahl der Elemente der Matrix bedingter Wahrscheinlichkeiten des Knotens X
$C_{ti}(PZ)$	. . . Funktion zur Ermittlung des Aufwands (Kostenfunktion) einer Prüfung
$H(X)$	. . . Entropie (Informationsgewinn) von X
K	. . . . . Fehlerkandidatenliste
K_{ti}	. . . . . Menge der von Prüfung t_i überprüften Komponenten
$M(B|A)$	. . . Matrix mit bedingten Wahrscheinlichkeiten (CPT) im Knoten eines Bayes-Netzes
$P(A \cap B)$	. . . Verbundwahrscheinlichkeit der Ereignisse A und B
$P(A)$	. . . . Wahrscheinlichkeitsfunktion, Eintritt des Ereignisses A
$P(A|B)$	. . . Bedingte Wahrscheinlichkeit, Eintritt Ereignis A unter der Bedingung B
PZ	. . . . . Menge der Prüfzugänge eines Fahrzeugs inklusive der damit verbundenen Kosten
Sym_{ki}	. . . . . Menge der Symptome, auf Grund der ein Fehlerkandidat (K_i) verdächtigt wird
T	. . . . . Menge der Prüfungen
Ω	. . . . . Ereignisraum in der Wahrscheinlichkeitstheorie
ε	. . . . . Fortschreitender Erkenntnisgewinn während eines Prüfablaufs
$\lambda(B)$	. . . . Vektor der Einflussstärke aus Nachfolgerknoten im Knoten eines Bayes-Netzes
$\pi(B)$	. . . . Vektor der Einflussstärke aus Vorgängerknoten im Knoten eines Bayes-Netzes
$ef(t_i)$	. . . Effektivität der Prüfung t_i
f_{ti}	. . . . . Ergebnis der Prüfung t_i – Mögliche Werte: $=\{\emptyset, pass, fail\}$
$n_{Blätter}$	. . . Anzahl der Knoten in einem Bayes-Netz, die keine Nachfolger haben
n_{Eltern}	. . . Anzahl der Vorgängerknoten (Eltern) des Knotens X
n_{Knoten}	. . . Anzahl der Knoten in einem Bayes-Netz
$n_{state}(X)$	. . Anzahl der Zustände des Knotens X

Literaturverzeichnis

- [ASA05a] *ASAM MCD 3 Application programmer's interface specification Version 2.00.02.* 2005
- [ASA05b] *ASAM MCD 3 Programmer's reference guide Version 2.00.02 – Part 1-6.* 2005
- [ASA06] Norm 2006. *ASAM MCD 2D (ODX) Data Model Specification Version 2.1.0*
- [BCC⁺01] BRIGNOLO, R. ; CASCIO, F. ; CONSOLE, L. ; DAGUE, P. ; DUBOIS, P. ; DRESSLER, O. ; MILLET, D. ; STRUSS, P.: Integration von Design und Diagnoseerstellung in einen gemeinsamen Prozeß. In: *Elektronik im Kraftfahrzeug : VDI Tagung Baden-Baden*, 2001
- [BK05] BORGELT, Christian ; KRUSE, Rudolf: *Probabilistic Graphical Models for the Diagnosis of Analog Electrical Circuits.* 2005
- [BL04] BERTSCHE, Bernd ; LECHNER, Gisbert: *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau, Ermittlung von Bauteil und System-Zuverlässigkeiten; 3., überarbeitete und erweiterte Auflage.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004
- [BS84] BUCHANAN, B. G. ; SHORTLIFFE, E. H.: *Rule-Based Expert Systems; The MYCIN experiment of the Stanford Heuristic Programming Project.* Addison-Wesley, 1984
- [CDLS03] COWELL, R. G. ; DAWID, A. P. ; LAURITZEN, S. L. ; SPIEGELHALTER, D. J.: *Probabilistic Networks and Expert Systems.* Springer, 2003
- [Die06] DIESTEL, Reinhard: *Graphentheorie.* Springer, 2006
- [DUD05] *Duden; Das Fremdwörterbuch (CD-Rom) 8. Auflage.* 2005
- [Ehl03] EHLERS, Tiemo: *Verfahren zur Sicherstellung der Systemintegrität in Fahrzeugen mit vernetzten Steuergeräten*, TU-Braunschweig, Diss., 2003
- [Eur] EUROPÄISCHE UNION, 1998: *RICHTLINIE 98/69/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 13. Oktober 1998 über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen und zu Änderung der Richtlinie 70/220/EWG des Rates*
- [GB01] GÖKCAY, Korhan ; BILGIC, Taner: *Troubleshooting Using Probabilistic Networks and Value of Information / Bogazici University Bebek, Istanbul, Turkey.* 2001. – Forschungsbericht
- [GMS04] GÁMEZ, José A. ; MORAL, Serafín ; SAMERÓN, Antonio: *Advances in Bayesian Networks.* Springer, 2004
- [Gri07] GRIMM, Michael: *Verfahren zur Feststellung der Sicherheit von vernetzten, elektronischen Systemen im Kraftfahrzeug*, Universität Stuttgart, Diss., 2007
- [GRS00] GÖRZ, Günther ; ROLLINGER, Claus-Rainer ; SCHNEEBERGER, Josef: *Handbuch der Künstlichen Intelligenz.* Oldenbourg Verlag, 2000
- [Han03] HANDWEKSKAMMER, Kobelenz: *Pressemitteilung: Neuordnung der fahrzeugspezifischen Ausbildungsberufe.* 22.06.2003
- [Har07] HARMS, Mirko: *Diagnose elektronischer Fahrzeugsysteme durch Strukturanalysen*, TU-Braunschweig, Dissertation, 2007

- [HBR95] HECKERMAN, David ; BREESE, John S. ; ROMMELSE, Koos: Decision-Theoretic Troubleshooting. In: *Communications of the ACM* 38 (1995), Nr. 3, S. 49–57
- [Hei99] HEINZELMANN, Andreas: *Produktintegrierte Diagnose komplexer mobiler Systeme*, Universität Paderborn, Dissertation, 1999
- [Hei06] HEIDEN, U.: Kundenzufriedenheit durch Diagnose im Kraftfahrzeug? Ganzheitliche Betrachtung der Prozesskette Diagnose. In: *Fahrzeugelektronik im Fokus, Baden-Baden VDI-Berichte* 1957 (2006), S. 45–54
- [Hor05] HORSTMANN, Marc: *Verflechtung von Test und Entwurf für eine verlässliche Entwicklung eingebetteter Systeme im Automobilbereich*, TU-Braunschweig, Diss., 2005
- [HR76] HYAFIL, L. ; RIVEST, R. L.: Constructing optimal binary decision trees is NP-complete. In: *Information Process. Letters* 5, No.1 (1976), S. 15–17
- [HSA99] HEINSOHN, Jochen ; SOCHER-AMBROSIUS, Rolf: *Wissensverarbeitung. Eine Einführung*. Spectrum, 1999
- [IEE90] Norm IEEE Std. 610.12-1990 1990. *IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology*
- [IEE98] Norm IEEE Std. 1012-1998 1998. *IEEE Standard for Software Verification and Validation*
- [Ise03] ISERMANN, Rolf: *Modellgestützte Steuerung, Regelung und Diagnose von Verbrennungsmotoren*. Springer, 2003
- [Ise06] ISERMANN, Rolf: *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer, 2006
- [ISO89] Norm ISO 9141 1989. *Road Vehicles – Diagnostic Systems – Requirements for interchange of digital information*
- [ISO99] Norm ISO 14230 1999. *Road Vehicles – Diagnostic Systems – Keyword Protocol 2000 Part 1: Physical Layer; Part 2: Data Link Layer; Part 3: Implementation; Part 4: Requirements for emission-related systems*
- [ISO01] Norm ISO/IEC 9126-1,2,3 2001. *Software engineering – Product quality 1:Quality model 2:External metrics 3:Internal metrics*
- [ISO04] Norm ISO 15765 2004. *Road Vehicles – Diagnostics on CAN – Part 1: General Information; Part 2: Network layer Services; Part 3: Implementation of diagnostic services; Part 4: Requirements for emissions-related systems*
- [ISO05a] Norm ISO 15031 2005. *Road Vehicles – Diagnostic Systems - Requirements for Interchange of Digital Informations – Part 1: General Information; Part 2: Terms, definitions, abbreviations and acronyms; Part 3: Diagnostic connector and related electrical circuit; Part 4: Communication between vehicle and external equipment for emissions-related diagnostics; Part 5: Emissions-related diagnostic services; Part 6: Diagnostic trouble code definitions; Part 7:Data link security*
- [ISO05b] Norm ISO 14229 2005. *Road Vehicles – Unified diagnostic systems (UDS)*
- [ISO06a] Norm ISO 22900 2006. *Road Vehicles – Modular vehicle communication interface (MVCI) – Part 1: Hardware design requirements; Part 2: Diagnostic protocol data unit application programmer intervace (D-PDU API); Part 3: Diagnostic server application programmer interface (D-Server API)*
- [ISO06b] Norm ISO 22901-1 2006. *Road Vehicles – Open diagnostic data exchange (ODX) – Patrt 1: Data model specification*

- [ISO10] Norm ISO 13400 2010. *Road Vehicles – Communication between test equipment and vehicles over Internet Protocol – Part 1: General information and use case definition; Part 2: Network and transport layer requirements and services; Part 4: IEEE802.3 based wired vehicle interface; Part 4: Ethernet-based high-speed data link connector*
- [Jen01] JENSEN, Finn V.: *Bayesian Networks and Decision Graphs*. Springer, 2001 (Statistics for Engineering and Information Science)
- [JKK⁺00] JENSEN, Finn V. ; KJÆRULFF, Uffe ; KRISTIANSEN, Brian ; LANGSETH, Helge ; SKAANNING, Claus ; VOMLEL, Jiri ; VOMLELOVA, Marta: The SACSO methodology for troubleshooting complex systems / Aalborg University. 2000. – Forschungsbericht
- [JMFN09] JERHOT, Jiri ; MEINECKE, Marc-Michael ; FORM, Thomas ; NGUYEN, Thien-Nghia: *Methodik zur probabilistischen Selbstdiagnose der Umfeldwahrnehmung*, 2009
- [KBL⁺07] KRIEGER, Olaf ; BREUER, Andreas ; LANGE, Klaus ; MÜLLER, Tobias ; FORM, Thomas: *Wahrscheinlichkeitsbasierte Fahrzeugdiagnose auf Basis individuell generierter Prüfabläufe*. In: *VDI Mechatronik 2007 Innovative Produktentwicklung*, 2007
- [KBMa] KRIEGER, Olaf ; BREUER, Andreas ; MÜLLER, Tobias: *Diagnosesystem und Verfahren zum Erstellen eines Prüfablaufs für eine Diagnose eines mechatronischen Gesamtsystems*. – Patent/Offenlegungsschrift DE 10 2007 018 732 A1 2008.10.23 (Anmeldung: 04.2007)
- [KBMb] KRIEGER, Olaf ; BREUER, Andreas ; MÜLLER, Tobias: *Verfahren und Vorrichtung zur Unterstützung einer Diagnose eines elektrischen Systems mittels wahrscheinlichkeitsbasierter Fehlerkandidatenermittlung*. – Patent/Offenlegungsschrift 10 2007 010 978 A1 2008.09.11 (Anmeldung: 03.2007)
- [KBMS] KRIEGER, Olaf ; BREUER, Andrea ; MÜLLER, Tobias ; SIEBEL, Ulrich: *Diagnosesystem und Diagnoseverfahren für ein elektrische Komponenten umfassendes elektrisches System, insbesondere ein Kraftfahrzeugsystem*. – Patent/Offenlegungsschrift DE 10 2007 006 715 A1 2008.08.14 (Anmeldung: 02.2007)
- [KBS] KRIEGER, Olaf ; BREUER, Andreas ; SIEBEL, Ulrich: *Diagnosevorrichtung und Diagnoseverfahren zum Ausführen einer Diagnose eines mechatronischen Systems*. – Patent/Offenlegungsschrift DE 10 2007 015 140 A1 2008.10.02 (Anmeldung: 03.2007)
- [KLFM09] KRIEGER, Olaf ; LANGE, Klaus ; FORM, Thomas ; MÜLLER, Tobias C.: *Wahrscheinlichkeitsbasierte Fahrzeugdiagnose mit automatischer Generierung von Prüfanweisungen*. In: *14. Internationale Konferenz Elektronik im Kraftfahrzeug Baden Baden , VDI-Berichte 2075 VDI Verlag GmbH*, 2009
- [KM05] KJÆRULFF, Uffe B. ; MADSEN, Anders L.: *Probabilistic Networks - An Introduction to Bayesian Networks and Influence Diagrams / Department of Computer Science Aalborg University, HUGIN Expert A/S*. 2005. – Forschungsbericht
- [KMB08] KRIEGER, Olaf ; MÜLLER, Tobias ; BREUER, Andreas: *Intelligente Fahrzeugdiagnose mit variabler Prüfstrategie*. In: *Diagnose in mechatronischen Fahrzeugsystemen*, 2008
- [KYM05] KAWAHARA, Yoshinobu ; YAIRI, Takehisa ; MACHIDA, Kazuo: *Diagnosis Method for Spacecraft using Dynamic Bayesian Networks / University of Tokyo, Department of Aeronautics and Astronautics, Research Center for Advanced Science and Technology*. 2005. – Forschungsbericht
- [Law00] LAWRENZ, Wolfhard: *CAN - Controller Area Network. Grundlagen und Praxis*. Hüthig, 2000

- [Lin09] LINDEMANN, Udo: *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden (VDI-Buch)*. Springer, Berlin, 2009
- [Lük03] LÜKE, Stefan: *Dezentraler Diagnoseansatz für dynamische und mechatronische Systeme*, TU Dresden, Dissertation, 2003
- [LPKB00] LERNER, Uri ; PARR, Ronald ; KOLLER, Daphne ; BISWAS, Gautam: *Bayesian Fault Detection and Diagnosis in Dynamic Systems / Stanford University*. 2000. – Forschungsbericht. – 531–537 S.
- [Mah00] MAHMOUD, Rachad: *Sicherheits- und Verfügbarkeitsanalyse komplexer Kfz-Systeme*, Universität-Gesamthochschule Siegen, Dissertation, 2000
- [Mas07] MASKE, Thomas: *Methoden zur Ermittlung des quantitativen Nutzens eines Anwendungssystems am Beispiel des Fehlerdiagnosesystems "Intelligent Finder" bei Volkswagen Nutzfahrzeuge*, Leibniz-Akademie Hannover, Diplomarbeit, 2007
- [MBK07] MÜLLER, Tobias ; BREUER, Andreas ; KRIEGER, Olaf: *Verfahren zur Herstellung eines Diagnosesystems, insbesondere für ein Kraftfahrzeug*. September 2007. – Patent/Offenlegungsschrift DE 10 2007 045 255 A1 2009.04.02 (Anmeldung: 09.2007)
- [MKB⁺09] MÜLLER, Tobias C. ; KRIEGER, Olaf ; BREUER, Andreas ; FORM, Thomas ; LANGE, Klaus: *A Heuristic Approach for Offboard-Diagnostics in Advanced Automotive Systems*. In: *SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems* October (2009), S. 344–351
- [MKF08] MÜLLER, Tobias ; KRIEGER, Olaf ; FORM, Thomas: *Evaluierung von Offboard-Diagnosesystemen am Beispiel eines erfahrungsbasierten Diagnoseverfahrens*. In: *Test und Simulation 2008 Berlin*, 2008
- [MKL⁺08] MÜLLER, Tobias ; KRIEGER, Olaf ; LANGE, Klaus ; BREUER, Andreas ; FORM, Thomas: *Neuronale Netzwerke für die Fehlerdiagnose in komplexen Fahrzeugsystemen*. In: *Diagnose in mechatronischen Fahrzeugsystemen*, 2008
- [Mül11] MÜLLER, Tobias C.: *Neuronale Modelle zur Offboard-Diagnostik in komplexen Fahrzeugsystemen*, TU-Braunschweig, Diss., 2011
- [MLB⁺07] MÜLLER, Tobias ; LANGE, Klaus ; BREUER, Andreas ; KRIEGER, Olaf ; FORM, Thomas: *Automatische erfahrungsbasierte Diagnose aus Felddaten mit neuronalen Netzen, Elektronik im Kraftfahrzeug*. In: *Elektronik im Kraftfahrzeug, VDI-Konferenz Baden-Baden*, 2007
- [Mur02] MURPHY, Kevin P.: *Dynamic Bayesian Networks / AI MIT*. 2002. – Forschungsbericht
- [Mut05] MUTZ, Martin: *Eine durchgängige modellbasierte Entwurfsmethodik für eingebettete Systeme im Automobilbereich*, TU-Braunschweig, Diss., 2005
- [Nea03] NEAPOLITAN, Richard E.: *Learning Bayesian Networks*. Prentice Hall, 2003
- [PA90] PATTIPATI, K.R. ; ALEXANDRIDIS, M.G.: *Application of heuristic search and information theory to sequential fault diagnosis*. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 20 (1990), S. 872 – 887
- [Pap08] PAPULA, Lothar: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3 - Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung 5. Auflage*. Vieweg, 2008
- [PD00] PAHL, Peter J. ; DAMRATH, Rudolph: *Mathematische Grundlagen der Ingenieureinformatik*. Springer, 2000

- [Pea88] PEARL, Judea: *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1988 (revised second)
- [Pfe99] PFEUFER, Thomas: *Modellgestützte Fehlererkennung und Diagnose am Beispiel eines Kraftfahrzeugaktors*, Institut für Automatisierungstechnik der TU Darmstadt, Dissertation, 1999. – Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8, Nr. 749 Prof. Rolf Isermann
- [Pup90] PUPPE, Frank: *Problemlösungsmethoden in Expertensystemen*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1990
- [PZMH01] PUPPE, Frank ; ZIEGLER, Susanne ; MARTIN, Ulrich ; HUPP, Jürgen: *Wissensbasierte Diagnosesysteme im Service-Support*. Springer, 2001
- [RK07] RENNINGER, Harald ; KONIECZNY, Martin: Dynamische Priorisierung von Prüfschritten in der Werkstattdiagnose. In: *Automatisierungstechnik 01* (2007), S. 28–34
- [RPS99] RAGHAVAN, V. ; PATTIPATI, K. ; SHAKERI, M.: Optimal and near-optimal test sequencing algorithms with realistic test models. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A* 29 (1999), S. 11–26
- [RTPPH04] RUAN, Sui ; TU, Fang ; PATTIPATI, K.R. ; PATTERSON-HINE, A.: On a multimode test sequencing problem. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B* 34 (2004), S. 1490–1499
- [SAE01] Norm SAE J1850 2001. *Class B Data Communication Network Interface Rev. May 2001*
- [SAE02] Norm SAE J2284 2002. *SAE J2284; High Speed CAN for Vehicle Application*
- [Sch06] SCHWARZKOPF, Susanne: *Generierung Bayesscher Netze zur wahrscheinlichkeitsbasierten Diagnose elektrischer Systeme*, Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, Diplomarbeit, 2006
- [Sch07] SCHWENNICK, Björn: *Verfahren zur Generierung von Prüfanweisungen zur Fehlereingrenzung in elektrischen Fahrzeugsystemen*, Fachhochschule Gelsenkirchen, Diplomarbeit, 2007
- [SEB⁺a] SIEBEL, Ulrich ; EHLERS, Tiemo ; BREUER, Andreas ; HENECKER, Frank ; MODRICH, Rolf ; RUEB, Gernot: *Verfahren und Vorrichtung zur Diagnose von Steuergeräten*. – Patent/Offenlegungsschrift DE 103 61 072 A1 2005.03.17 (Anmeldung: 12.2003)
- [SEB⁺b] SIEBEL, Ulrich ; EHLERS, Tiemo ; BREUER, Andreas ; HENECKER, Frank ; MODRICH, Rolf ; RUEB, Gernot: *Verfahren und Vorrichtung zur Fehlerlokalisierung bei vernetzten Steuergeräten*. – Patent/Offenlegungsschrift DE 103 32 194 A1 2005.03.24 (Anmeldung: 07.2003)
- [SH04] SEIBOLD, Werner ; HÖFIG, Bernhard: Sichere Fehlerdiagnose in der Automobilwartung mit RODON 3. In: *Automotive Electronics (ATZ, MTZ)* I (2004), S. 70–75
- [SJK00] SKAANING, C. ; JENSEN, F. V. ; KJAERULFF, U.: Printer troubleshooting using Bayesian Networks. In: *The Thirteenth International Conference on Industrial & Engineering Applications of AI & Expert Systems*, 2000
- [SL05] SPILLNER, Andreas ; LINZ, Tilo: *Basiswissen Softwaretest, 3. Auflage*. dpunkt.verlag, 2005
- [SS02] SAAKE, Gunter ; SATTler, Kai-Uwe: *Algorithmen und Datenstrukturen, Eine Einführung mit Java*. dpunkt.verlag, 2002

- [SS04] STEINDER, M. ; SETHI, A.S.: Probabilistic fault localization in communication systems using belief networks. In: *Networking, IEEE/ACM Transactions on* 12 (2004), S. 809–822
- [Ste07] STELAND, Ansgar: *Basiswissen Statistik; Kompaktkurs für Anwender aus Wirtschaft, Informatik und Technik*. Springer, 2007
- [SW63] SHANNON, Claude E. ; WEAVER, Warren: *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, 1963
- [Tap04] TAPPE, Robert: *Verfahren zur Dynamisch Intelligenten Fehlersuche in komplexen Systemen Exemplarischer Einsatz im Kfz-Bereich*, Universität Siegen, Dissertation, 2004
- [Thu04] THUMS, Andreas: *Formale Fehlerbaumanalyse*, Fakultät für Angewandte Informatik der Universität Augsburg, Dissertation, 2004
- [Ver00] VERSTEEGEN, Gerhard: *Das V-Modell in der Praxis*. dpunkt.verlag, 2000
- [Vom07] VOMLELOVÁ, Marta: Complexity of decision-theoretic troubleshooting. In: *International Journal of Intelligent Systems* 18 (2007), S. 267–277
- [VV03] VOMLELOVA, Marta ; VOMLEL, Jirí: Troubleshooting: NP-hardness and solution methods. In: *Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications* 7 (2003), S. 357–368. – Proceedings of the Fifth Workshop on Uncertainty Processing, WUPES'2000
- [Wit02] WITTIG, Frank: *Maschinelles Lernen Bayesscher Netze für benutzeradaptive Systeme*, Universität des Saarlandes, Dissertation, 2002
- [WMI05] WEIDL, G. ; MADSEN, A. L. ; ISRAELSON, S.: Object-Oriented Bayesian Networks for Condition Monitoring, Root Cause Analysis and Decision Support on Operation of Complex Continuous Processes: Methodology & Applications / Institute for Systems Theory in Engineering University of Stuttgart, Hugin Expert A/S, ABB Group Services. 2005. – Forschungsbericht
- [ZS07] ZIMMERMANN, Werner ; SCHMIDGALL, Ralf: *Bussysteme in der Fahrzeugtechnik, Protokolle und Standards, 2. Auflage*. Vieweg ATZ/MTZ-Fachbuch, 2007

Index

- Abhängigkeitsstrukturen, 21
- ASAM-ODX, 12
- Ausfallwahrscheinlichkeit, 7
- Bayes-Netze, 18
 - diskrete Zufallsknoten, 24
 - dynamische, 24
 - kontinuierliche Zufallsknoten, 24
 - objektorientierte, 24
- BeschreibungDerZuUntersuchendenDiagnosesysteme, 102
- Breitensuche, 67
- CAN, 5
- Diagnose, 6
 - erfahrungsbasierte, 16
 - modellbasierte, 15
 - regelbasierte, 13
 - wahrscheinlichkeitsbasierte, 25
- Diagnoseroutine, 9
- Diagnosesystem
 - Bewertung
 - Verfahren, 101
 - Evaluiierung, 101
- Diagnosetiefe, 7
- DTC, 10
- Durchgangsprüfungen
 - Generierung, 66
- Entropie, 89
- EOBD, 8
- Ereignisspeichereintrag, 10
- Evidenz, 21
- Fahrzeugdiagnose, 6
- Fehlerkandidat, 7, 29
 - Top-Fehlerkandidat, 92
 - Prüfung, 92
- Fehlerkandidatenliste
 - gewichtete, 84
- Fehlerschauer, 7, 29
- Fehlersuchprogramm, 14
 - manuell erstellt, 77
- Fehlersymptome, 28
- Fehlerwahrscheinlichkeit, 7, 68
 - kombinierte, 88
- Felderfahrungen, 28
- FiDis, 102
- FlexRay, 5
- FMEA, 14
- Folgefehler, 8
- Geführte Fehlersuche (GFS), 14
- GFS, 107
- Graph, 20, 65
 - Baum, 20
 - Clique, 20
 - DAG, 20
 - gerichteter, 20
 - Graphentheorie, 20
 - Pfad, 20
 - ungerichteter, 20
 - voll vernetzter, 20
 - Zyklus, 20
- Informationsgewinn
 - Nutzung, 90
- Kanten, 20
 - divergierende, 22
 - kaskadierende gerichtete, 21
 - konvergierende, 21
- Knoten, 20
 - diskrete Zufallsknoten, 24
 - Elternknoten, 20
 - Kindknoten, 20
 - kontinuierliche Zufallsknoten, 24
 - Ursachenknoten, 21
 - Wirkungsknoten, 21
- Kundenwahrnehmung, 28
- Kupferpfad, 66
- LIN, 5
- Masseprüfungen, 68
- Mehrfachfehler, 7
- MOST, 5
- Neucus, 106
- OBD-II, 8
- OBD-Scantool, 13
- Off-Board-Diagnose, 13
- Phantomfehler, 10
- Prüfablauf
 - dynamischer, 83, 85
- Prüfanweisungen

- parametrierbare, 64
- Prüfergebnis
 - Auswertung, 97
- Prüfplan
 - dynamischer, 94
- Prüfschritte
 - individuelle Generierung, 63
- Prüfsequenzproblem, 85
- Prüfstrategie
 - zweistufige, 91
- Prüfung
 - Aufwand, 87
 - Auswahl, 96
 - Clusterung, 93
 - Effektivität, 92
 - Hinzufügen und Entfernen, 94
 - Informationsgewinn, 89
- Prüfungen
 - Aktualisierung, 78
 - Bewertung, 86
 - Generierung und Ausgabe, 64
- probalistic networks, 18
- propagieren, 22
- Signaldefinition, 69
- Signalprüfung
 - komplexe Signale, 75
- Spannungsprüfungen, 68
- Stellgliedtest, 11
- Stochastische Unabhängigkeit, 19
- Strukturbeschreibung, 65
- Testziel:Fehlerkandidatenermittlung, 57
- Tiefensuche, 67
- Variantenvielfalt, 27
- VCI, 12
- Vertrauen, 20
- Wahrscheinlichkeit
 - a posteriori, 20, 22
 - a priori, 20, 22
 - absolute, 19
 - bedingte, 18
 - Ereignisraum, 18
 - Formel von Bayes, 19
 - Verbundwahrscheinlichkeit, 19
 - Wahrscheinlichkeitsfunktion, 18
 - Wahrscheinlichkeitstheorie, 18
 - Wahrscheinlichkeitsverteilung, 21